

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJIMOKHTAR-ANNABAUNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté des Sciences de l'Ingénierat

Département de Génie des Procédés

Spécialité : Génie des Procédés

## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **Master**

### CALCUL THERMIQUE DE L'ECHANGEUR 123C DE L'UNITE AMMONIAC (FERTIAL-ANNABA)

Présenté par :

SOLTANI Abd El-Kader

**DIRECTEUR DE MEMOIRE** : DJERAD Souad, Prof, Université Badji Mokhtar- Annaba

Devant le jury :

**Président** : DJERAD Souad, Prof, Université Badji Mokhtar-Annaba

**Membre** : MENADJLIA Leila, MCB, Université Badji Mokhtar-Annaba

**Membre** : HAMOUCHE Karima, MAA, Université Badji Mokhtar-Annaba

Année 2017

# ***-Remerciements-***

*On premier lieu on remercie le bon dieu qui nous a donné la santé de pouvoir suivre nos études.*

*Mes plus profonds remerciements vont à mes parents. Tout au long de mon cursus, ils m'ont toujours soutenu, encouragé et aidé. Ils ont su me donner toutes les chances pour réussir. Qu'ils trouvent, dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de leurs efforts ainsi que l'expression de ma plus affectueuse gratitude.*

*Comme nous tenons aussi à remercier tous nos enseignants de la faculté de génie des procédés de l'université BadjiMokhtar Annaba en particulier notre professeur encadreur DjeradSouad pour ses conseils et orientations qui nous ont été très bénéfiques.*

*Aussi Toute notre gratitude à tout le personnel des services procès et inspection équipementsFertial-Annaba en particulier à :*

*M .ADEL BELHACINI*

*M<sup>lle</sup> .AICHA GOUASMIA*

*M .KARIM ATEK*

## Table des matières :

liste d'abréviations.....	1
liste des tableaux .....	3
liste des figures .....	3
Introduction générale.....	6
CHAPITRE I : Présentation du lieu du stage	
1) Historique de l'entreprise : .....	8
2) Présentation générale du FERTIAL Annaba :.....	8
2-1) Situation géographique :.....	8
2-2) organigramme du complexe FERTIAL-Annaba :.....	9
2-3) principales activités :.....	10
2-4) les objectifs de l'entreprise : .....	10
3) Présentation d'unité d'ammoniac à FERTIAL-Annaba :.....	11
4) Positionnement de l'échangeur de chaleur 123C par rapport à l'unité de l'ammoniac :.....	11
CHAPITRE II : Caractéristiques et problèmes de l'échangeur 123C	
1) Introduction :.....	13
2) Le rôle de l'échangeur de chaleur 123-C dans la section synthèse de l'unité de production de l'ammoniac $\text{NH}_3$ à FERTIAL ANNABA :.....	13
3) Composition et principe de fonctionnement de l'échangeur de chaleur 123C ....	16
4) Caractéristiques technique et performance de l'échangeur 123-C : .....	18
4-1) la calandre + les boites de distribution : .....	20
4-2) les plaques tubulaires : .....	22
4-3) faisceau tubulaire :.....	24
4-4) Les chicanes :.....	25
5) Problèmes de 123C : .....	27
5-1) Contrôle et réparation des défauts au niveau de 123 C.....	28
A) Soudure circulaire de la plaque tubulaire avec le fond supérieur :.....	28

B) soudure tubes et bouchon sur la plaque tubulaire :.....	33
6) CND général après fin des travaux :.....	35
7) Conclusion :.....	36

### CHAPITRE III : Calcul de l'échangeur 123C

1) Introduction .....	38
2) Données du calculs .....	38
3) Application .....	39
3-1) Expression du flux échangé.....	39
3-2) Différence de température logarithmique moyenne (DTLM) .....	42
3-3) Coefficient global d'échange pour l'échangeur 123C.....	43
3-3-1) Calcul du coefficient d'échange h coté tube .....	43
3-3-2) Calcul de coefficient $h_2$ coté calandre .....	46
3-3-3) calcul de la résistance globale d'encrassement dans l'échangeur 123C ....	50
3-4) Calcul de la surface d'échange .....	52
3-5) calcul des pertes de charge .....	54
3-6) Température de métal des tubes .....	56
3-7) efficacités de l'échangeur 123C.....	58
4) Conclusion .....	59
 Conclusion générale .....	 61
 références bibliographique :.....	 63

## Liste d'abréviations :

symbole	définition	unité
$\Phi$	Quantité de chaleur échangée	kcal/h
$\dot{M}$	Débit massique du fluide chaud (gaz)	kg/h
$\dot{m}$	Débit massique du fluide froid (eau)	kg/h
$C_{p1}$	Chaleur spécifique du fluide chaud	kcal/ (kg.°C)
$C_{p2}$	Chaleur spécifique du fluide froid	kcal/ (kg.°C)
$T_1$	Température d'entrée du fluide chaud	°C
$t_1$	Température d'entrée du fluide froid	°C
$T_2$	Température de sortie du fluide chaud	°C
$t_2$	Température de sortie du fluide froid	°C
$q_{c1}$	débit calorifique du fluide chaud	kcal/ (h.°C)
$q_{c2}$	débit calorifique du fluide froid	kcal/ (h.°C)
<b>A</b>	Surface totale d'échange	m <sup>2</sup>
<b>U</b>	Coefficient global du transfert de chaleur	kcal/m <sup>2</sup> h °C
<b><math>\Delta T_{ml}</math></b>	Différence de température moyenne logarithmique	°C
<b>R</b>	résistance thermique global	m <sup>2</sup> h °C / kcal
<b>F</b>	facteur correctif de la différence de température	sans dimension
<b><math>R_s</math></b>	résistance globale d'encrassement	m <sup>2</sup> h °C / kcal
<b>E</b>	épaisseur des tubes	m
$\Lambda$	conductivité thermique de la paroi des tubes	kcal/ (m h°C)
$\lambda_2$	Conductivité thermique fluide coté tube (chaud)	kcal/ (m h°C)
$\lambda_1$	Conductivité thermique fluide coté calandre (froid)	kcal/ (m h°C)
$h_1$	coefficient du transfert de thermiques à l'intérieur des tubes	kcal/m <sup>2</sup> h °C
$h_2$	coefficient du transfert de thermiques à l'extérieur des tubes	kcal/m <sup>2</sup> h °C
$A_t$	section de passage coté tube	m <sup>2</sup>
$N_t$	nombre des tubes	/
<b>Di</b>	diamètre intérieur des tubes	m
<b>D</b>	diamètre extérieur des tubes	m
$G_t$	vitesse massique du fluide chaud (coté tube)	kg/(h. m <sup>2</sup> )
$Re_1$	nombre de Reynolds coté tube	adimensionnel
$Re_2$	nombre de Reynolds coté calandre	adimensionnel
$Pr_1$	nombre de Prandtl coté tube	adimensionnel
$Pr_2$	nombre de Prandtl coté calandre	adimensionnel
$Nu_1$	nombre de Nusselt coté tube	adimensionnel
$Nu_2$	nombre de Nusselt coté calandre	adimensionnel
$\mu_1$	viscosité dynamique du fluide chaud (coté tube)	Kg/m.h
$\mu_2$	viscosité dynamique du fluide froid (coté calandre)	Kg/m.h

### Suite de liste d'abréviations :

symbole	définition	unité
$G_c$	vitesse massique moyenne du fluide froid (coté calandre)	kg/(h. m <sup>2</sup> )
$G_{ct}$	vitesse massique transversale	kg/(h. m <sup>2</sup> )
$S_{libre}$	l'aire du segment libre à la section intérieure de la calandre	m <sup>2</sup>
$S_{interieur}$	la section intérieure de la calandre	m <sup>2</sup>
$X$	le rapport de l'aire du segment libre à la section intérieure de la calandre	adimensionnel
$U_p$	coefficient du transfert de chaleur propre.	kcal/m <sup>2</sup> h °C
$U_s$	coefficient du transfert de chaleur sale.	kcal/m <sup>2</sup> h °C
$S_{disponible}$	la surface d'échange disponible sur l'échangeur	m <sup>2</sup>
$h_{ie}$	le coefficient du film interne rapporté à la surface extérieure	kcal/m <sup>2</sup> h °C
$n_t$	nombre de passe coté tubes	/
$n_c$	nombre de passe coté calandre	/
$d$	densité du fluide coté tube	adimensionnel
$f_t$	coefficient de friction	adimensionnel
$\Delta P_t$	pertes de charge à l'intérieur des tubes	Bar
$L$	longueur des tubes	m
$\Delta P_c$	pertes de charges à l'extérieur des tubes (coté calandre)	Bar
$T_c$	température calorique du fluide chaud	°C
$t_c$	température calorique du fluide froid	°C
$t_t$	température des tubes	°C

### Liste des tableaux :

Tableau 1-1 représentés les principaux pays vers les quels l'entreprise export ses produits.

Tableau 2-1 : matière de construction et dimensions (calandre +boite).

Tableau 2-2 : nomenclature des repères (S) et (T).

Tableau 2-3 : autres caractéristiques.

Tableau 2-4 : Caractéristique des plaques tubulaire.

Tableau 2-5 : caractéristiques techniques des tubes.

Tableau 3-1 : caractéristiques des fluides.

Tableau 3-2 : caractéristiques de la calandre de l'échangeur 123C.

Tableau 3-3 : caractéristiques des tubes de l'échangeur 123C.

Tableau 3-4 : aire de passage, distance minimal de passage et espacement entre tubes perpendiculairement au courant en fonction du type du pas des tubes.

Tableau 3-5 : Nomenclature.

### Liste des figures :

Fig 1-1 : photo Vue du ciel Fertial-Annaba.

Fig 1-2 : Organigramme du complexe Fertial-Annaba.

Fig 1-3 : photo d'échangeur 123C dans l'unité d'ammoniac.

Fig 2-1 : Partie du schéma de la synthèse d'ammoniac + le réacteur de synthèse d'ammoniac

Fig 2-2 : Faisceau tubulaire

Fig 2-3 : Calandre.

Fig 2-4 : Plaque tubulaire.

Fig 2-5 : Lepas triangulaire au niveau de la plaque tubulaire du 123C.

Fig 2-6 : Plaque tubulaires + chicanes.

Fig 2-7 : Boîtes de distribution du gaz.

Fig 2-8 : table des différentes configurations possibles d'un échangeur de chaleur tubulaire.

Fig 2-9 : boîte tubulaire + calandre.

Fig2-10 : Une esquisse détaillée pour les plaques tubulaires.

Fig 2-11 partie de la Plaque tubulaire supérieure de l'échangeur 123-C.

Fig 2-12 : Emplacement des chicanes par rapport aux tubes et plaques tubulaires.

Fig 2-13 : emplacement des tirants et entretoises.

Fig 2-14 : déflecteur

Fig2-14 : laprésence de corrosion est claire au niveau des joints de soudure de la plaque tubulaire supérieure avec virole (boîte de distribution).

Fig 2-15 : Le contrôle par ressuage montre l'ampleur de la fissure sur joint soudure plaque supérieur avec virole (A) et on peut remarquer aussi certaines fissures sur joints des soudures tube avec plaque (B).

Fig 2-16 : Contrôle par ressuage montre des fissures superficielles sur le fond supérieur de la calandre.

Fig2-17 : Contrôle par ressuage montre des fissures sur le fond inférieur de la calandre.

Fig 2-18 : courbe de dégazage des plaques tubulaires supérieur et inférieur.

Fig 2-19 : courbe de préchauffage de la plaque tubulaire pour soudage.

Fig 2-20 : accostage du bouchon biseauté dans le tube.

Fig 2-21: Un contrôle par MPI fluorescent réalisé au niveau de la plaque tubulaire supérieure sur les réparations ne montre aucun défaut.

Fig 2-22 : La nouvelle soudure de plaque tubulaire supérieure avec la virole et aussi avec certains tubes après réparation.

### Introduction générale :

L'énergie est considérée comme une base importante du développement économique et du bien-être. Elle est utilisée aussi bien dans les processus de production de l'industrie et de l'agriculture que dans les services. C'est pourquoi, elle est souvent considérée comme le troisième facteur de production à côté du travail humain et du capital.

L'énergie représente une ressource stratégique pour toute économie nationale. Sa disponibilité et son prix déterminent sa capacité productive et par cela, dans une certaine mesure, la capacité compétitive d'un pays dans la concurrence économique internationale. Elle occupe une place très importante dans la vie de l'être humain pour son bien-être.

En Algérie, Les sources d'énergie utilisées dans notre vie quotidienne de plus de l'énergie solaire et hydraulique viennent principalement de l'industrie d'hydrocarbure (chimique et pétrochimique) tel que le gaz naturel et le pétrole.

Dans notre pays, les hydrocarbures sont considérés comme le nerf de l'économie national. Ils sont utilisés dans tous les domaines, comme la production d'électricité, dans le chauffage, dans les ménages et aussi pour la circulation des véhicules comme carburant des tous types des véhicules.

L'utilisation du gaz naturel dans la production de l'ammoniac est considérée comme le procédé le plus propre et le plus rentable par rapport aux autres procédés.

L'ammoniac est la matière première nécessaire pour la production des engrais azoté à titre d'exemple l'ammonitrate granulé, ammonitrate liquide, U.A.N (urée ammonitrate à 30% d'azote) , C.A.N (calcium ammonitrate à 27% d'azote) et encore entre dans l'enrobage des engrais phosphaté (N.P.K).

Dans un plan stratégique, il se trouve trois unités symétriques de production d'ammoniac par synthèse en Algérie sont installées deux à Arzew et une à Annaba avec une capacité globale de 1 000 000 de tonnes par ans.

Ce travail a été réalisé au sein de l'unité d'ammoniac à Fertil-Annaba au cours duquel j'ai étudié le procédé de production de l'ammoniac et focalisé mon attention sur un échangeur de chaleur (le 123C) du type tube et calandre qui joue un rôle très important dans le refroidissement de gaz de synthèse. J'ai effectué un calcul thermique a fin de déterminer les quantités de chaleur échangées au cours du refroidissement des gaz de synthèse et déterminé la surface d'échange des tubes que j'ai avec celle donnée par le design.

### 1) Historique del'entreprise :

A l'aube de l'indépendance la situation du secteur de l'industrie des produits chimiquesmontrait une faiblesse notable dans les capacités de production installée qui se limitait à de petites unités de fabrication vétustes, utilisant des procédés archaïques. C'est pourquoi la SONATRACH (société mère) a mis en œuvre une stratégie de développement globale dans le cadre de la politique du développement de l'industrie pétrochimique et principalement la de l'agriculture algérienne qui présente un outil indispensable dans l'indépendance du pays. En1972 la société prend le nom du complexe d'engrais phosphaté de Bône CEPB. L'année 1977 a été une année charnière dans la vie de l'entreprise CEPB-SONATRACH, où elle a vu sa réceptionavec le délestage des activités secondaires et recentrage sur son métier de base à savoir la fabrication de l'ammoniac et des engrais. Puiselle devientASMIDAL en septembre 1984.

En août 2005 une nouvelle société a étécréée résultant d'un partenariat signé entre le Groupe algérien ASMIDAL et le groupe espagnol GrupoVillar Mir. Ils détiennent respectivement 34% et 66% du capital.[1]

### 2) Présentation générale de FERTIAL Annaba :

#### 2-1) Situation géographique :

L'usine est située à 04 Km de la ville d'Annaba, elle est limitée par Oued Seybouse et la cité Sidi- Salem à l'Est, la cité Seybouse à l'ouest, la mer méditerranée au Nord et la route nationale n° :44 et la plaine de Annaba au Sud.



Fig 1-1 : photo vue du ciel Fertial-Annaba[2]

2-2) Organigramme du complexe FERTIAL-Annaba :

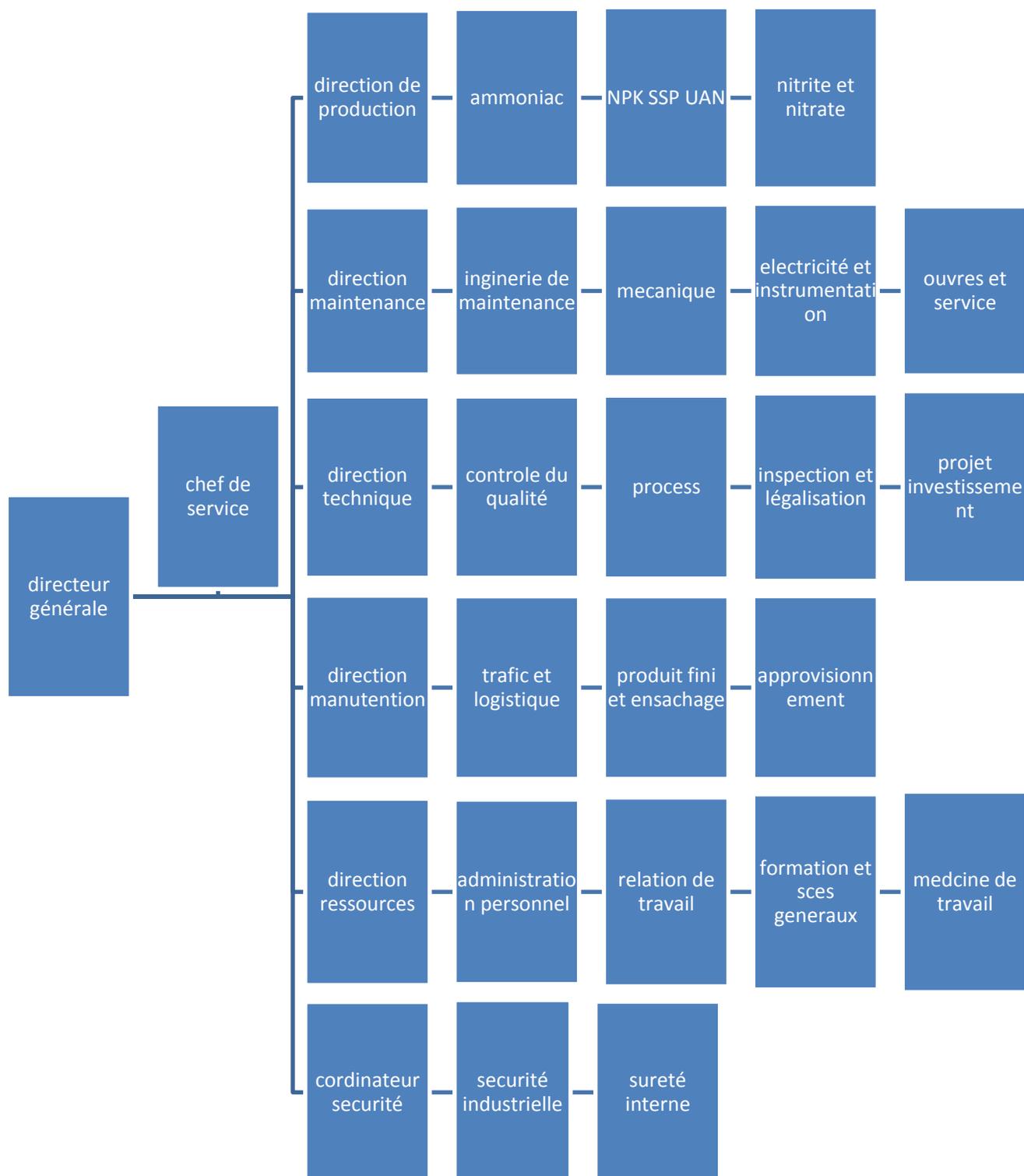


Fig 1-2 : Organigramme du complexe Fertial Annaba[1]

**2-3) principales activités :**

FERTIAL Annaba présente plusieurs activités :

- \*) production d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) : capacité 1000T/J.
- \*) production nitrate d'ammonium : 02 lignes de 500 T/J chacune.
- \*) production des engrais phosphatés 100T/J.
- \*) SSP (super simple phosphate) : capacité 1200T/J.
- \*) UAN (urée acide nitrique) :600T/J
- \*) autre engrais azotés (nitrique d'ammoniac ...etc.)<sup>[1]</sup>

Une certaine partie du nitrate et de l'ammoniac est autoconsommée par FERTIAL même pour la production d'autres produits.

**2-4) Les objectifs de l'entreprise :**

Dans le cadre national du développement économique et social du pays, l'entreprise est chargée de :

- Promouvoir et développer l'industrie des engrais et produits phytosanitaire.
- Exploiter, gérer et rentabiliser les moyens humains, matériels et financiers dont elle dispose.
- En vue de satisfaire les besoins du marché national et international
- Développer la coopération dans le cadre de la politique nationale en la matière.<sup>[1]</sup>

Sur le tableau 1-1 sont représentés les principaux pays vers les quels l'entreprise export ses produits.

Tableau 1-1:principaux Produits exportés de Fertial.

production	Pays
-NH <sub>3</sub>	-Espagne, France, Italie, Grèce, Belgique, Cuba, Grande-Bretagne
-Nitrate	-Tunisie, Maroc
-UAN	-France, Espagne, USA
-SSP	-Maroc, Grèce, France, Italie, Brésil

### 3) Présentation d'unité d'ammoniac à FERTIAL-Annaba :

La conception générale de l'unité bénéficie des toutes les dernières technologies destinées à réduire les frais d'exploitation et à faciliter le fonctionnement.

Ce stage de fin d'études a été réalisé au sein de l'unité de l'ammoniac. Cette unité produit 100T/J d'ammoniac liquide anhydre à partir de gaz naturel.

Les étapes principales du procédé sont les suivantes :

- 1) La désulfuration du gaz naturel par l'adsorption sur catalyseur d'oxyde de zinc.
- 2) Reformage primaire et secondaire à haute pression.
- 3) Conversion de CO à haute – et basse températures.
- 4) Décarbonatation du gaz synthèse au moyen d'une solution aqueuse de monoéthanolamine (MEA) régénérative.
- 5) Méthanation des oxydes de carbone afin d'en réduire la teneur dans le gaz de synthèse à un niveau inférieur à 10 ppm.
- 6) Synthèse de l'ammoniac dans un réacteur KELLOG à trempe.
- 7) Réfrigération et stockage.[3]

### 4) Positionnement de l'échangeur de chaleur 123C par rapport à l'unité de l'ammoniac :

L'échangeur 123C est installé dans la section de synthèse exactement entre l'échangeur de chaleur 122C installé en tête de 105D(réacteur de synthèse) et l'échangeur de chaleur 121C.



Fig 1-3 : photo d'échangeur 123C dans l'unité d'ammoniac

### 1) Introduction :

Les processus les plus couramment rencontrés dans l'industrie chimique et pétrochimique font intervenir l'échange de chaleur entre deux fluides. Le système utilisé dans cette situation est un échangeur de chaleur : C'est un appareil destiné à transférer un flux de chaleur d'un fluide à un autre. En général, les deux fluides sont séparés par une paroi (simple ou composée) constituant ainsi une résistance thermique. Dans certains équipements, le transfert thermique se fait par contact indirect entre les fluides.[4]

Les échangeurs à tubes et calandre sont parmi les plus utilisés dans les industries de procédé et particulièrement dans la chimie et pétrochimie.

La construction de l'échangeur 123C conforme au code " TEMA CLASSE R" (TubularExchangerManufacturer's Association) où la classe R désigne le type des échangeurs destinés au procédés chimiques et pétrochimiques à haute température et à haute pression. [5] [6]

### 2) Le rôle de l'échangeur de chaleur 123-C dans la section synthèse de l'unité de production de l'ammoniac $\text{NH}_3$ à FERTIAL ANNABA :

Dans l'unité d'ammoniac (Fertial) il existe 132 échangeurs de chaleur destinés dans la plupart des cas au refroidissement des fluides chaud circulant entre les différents compartiments de l'unité. Dans ce travail on s'intéresse à l'un d'eux, il s'agit de l'échangeur 123C situé en aval d'un autre échangeur 121C situé au sommet du réacteur catalytique de la synthèse de l'ammoniac (Fig 2-1).

Le gaz sortant du convertisseur est ensuite refroidi dans deux échangeurs 123C et 121C jusqu'à 24°C et divisé en deux parties:

\*La première partie est refroidie dans les échangeurs 139C, 125C jusqu'à -23°C et séparée dans les séparateurs 108F puis envoyer vers le ballon collecteur 107F

\*La deuxième partie est recyclée vers le deuxième étage du compresseurs 103J à 24,6 bars et 38°C où il est comprimé jusqu'à 63 bars et à 187°C.

Le mélange des gaz refoulés du deuxième étage à 150 bars et à une température de 74°C est refroidi à l'eau tempérée jusqu'à 35°C dans l'échangeur 124C, puis il est divisé en deux courants:

Un courant est refroidi à -9°C dans l'échangeur 120C, L'autre courant est refroidi jusqu'à 19°C dans l'échangeur 117C, puis jusqu'à -2°C dans l'échangeur 118C.

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES ET PROBLEMES DE L'ECHANGEUR 123C

Le mélange des deux courants qui donne une température de  $-6^{\circ}\text{C}$  est soumis à un dernier refroidissement à  $-23^{\circ}\text{C}$  dans l'échangeur 119C. Puis il passe dans le séparateur 106F où le liquide sera transféré vers le ballon collecteur 107F.

Les gaz incondensables venant du 107F et 108F sortants des deux séparateurs sont utilisés comme combustibles dans le reforming primaire alors que l'ammoniaque liquide est transférée au ballon de réfrigération 112F d'avantage jusqu'à  $-33,3^{\circ}\text{C}$ .

Les vapeurs d'ammoniac provenant du séparateur 112F sont comprimées dans compresseur 105J ensuite condensées dans les condenseurs 127C (CA et CB) où ils seront pompés vers le BAC de stockage T101.[3]

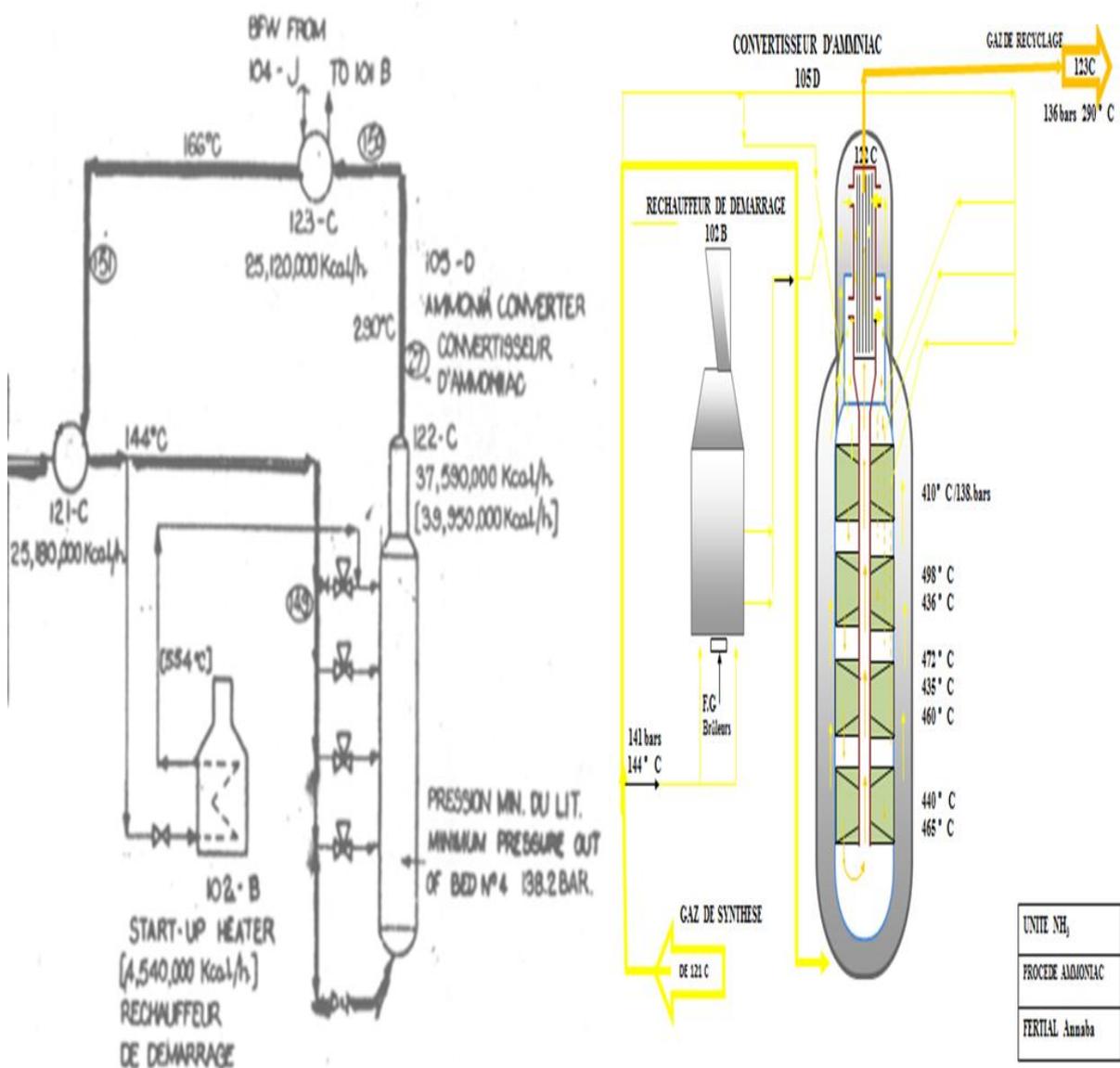


Fig 2-1 : Partie du schémade la synthèse d'ammoniacà gauche et le réacteur de synthèse d'ammoniac à droite.

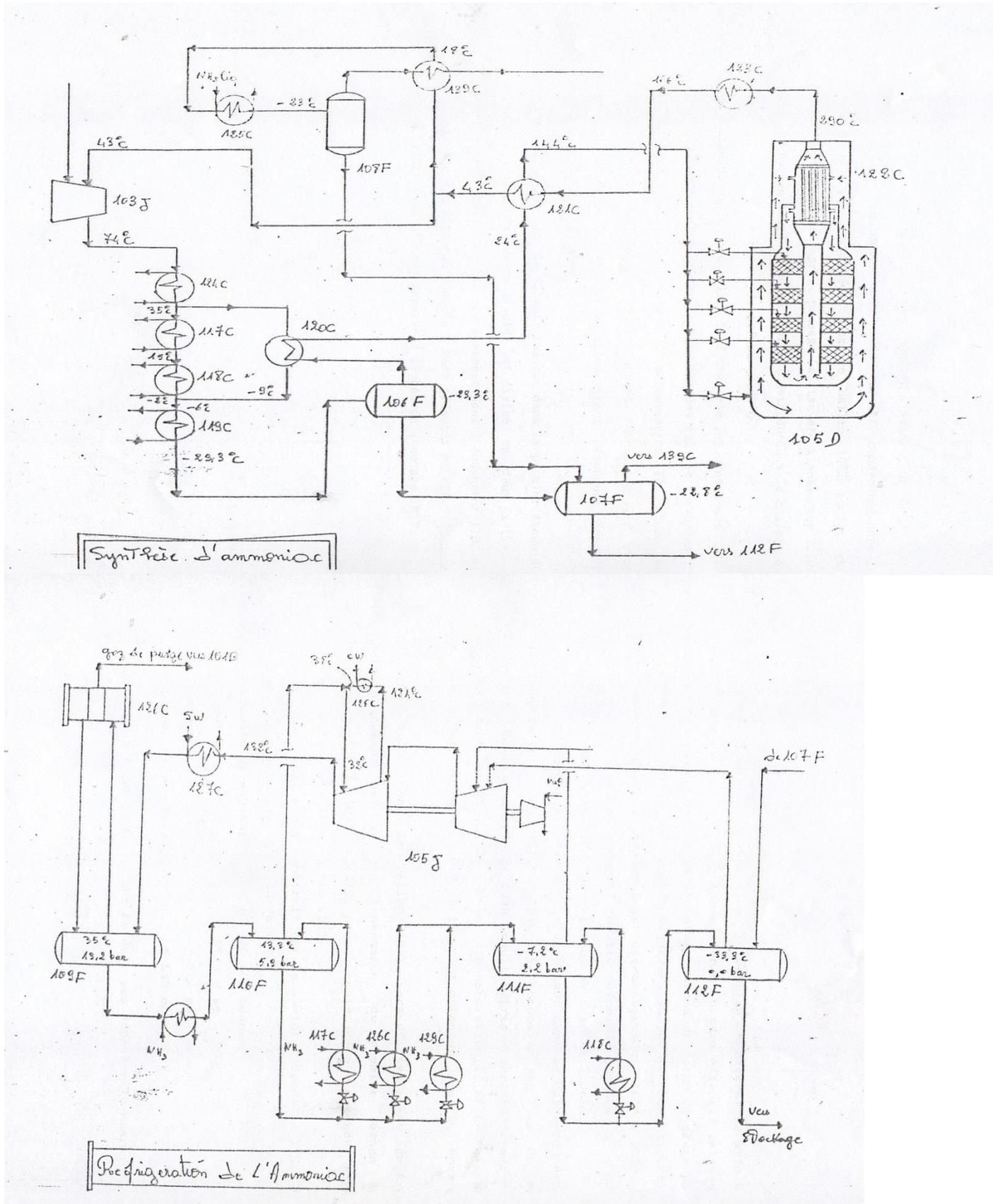


Fig 2-2 : Plan dusynthèse et réfrigération de l'ammoniac

### 3) Composition et principe de fonctionnement de l'échangeur de chaleur 123C

Dans l'échangeur 123C à tubes et calandre, le gaz synthèse appelé fluide côté tubes circule à l'intérieur d'un ensemble de tubes parallèles appelé faisceau tubulaire (Fig 2-3) du haut vers le bas (mouvement descendant).

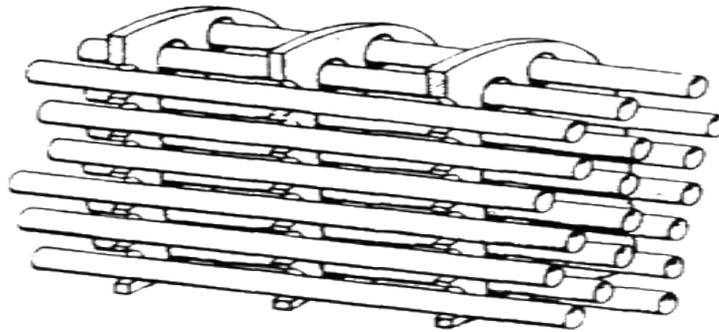


Fig 2-3 : Faisceau tubulaire

Ces tubes sont enfermés dans une enveloppe appelée calandre (Fig 2-4).

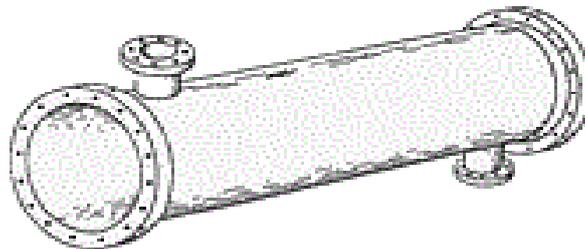


Fig 2-4 : Calandre

L'autre fluide appelé fluide côté calandre (eau de refroidissement) circule à l'intérieur de la calandre mais à l'extérieur des tubes du bas vers haut (mouvement ascendant).

Les tubes et la calandre sont soumis à la pression des fluides et doivent donc être construits pour y résister.

Les tubes sont fixés à leur extrémités dans les plaques perforées appelées plaques tubulaires (Fig 2-5).

Le montage ou la fixation des tubes dans les plaques tubulaires est généralement réalisé par mandrinage et le dudgeonnage de leurs extrémités dans des trous percés

dans les plaques. Ce mandrinage peut se faire sur les deux plaques. Et aussi on peut mandriner les deux cotés (plaques) et souder les tubes aux plaques pour des échangeurs fonctionnant à haute pression et à haute température, c'est exactement le cas de l'échangeur 123C.

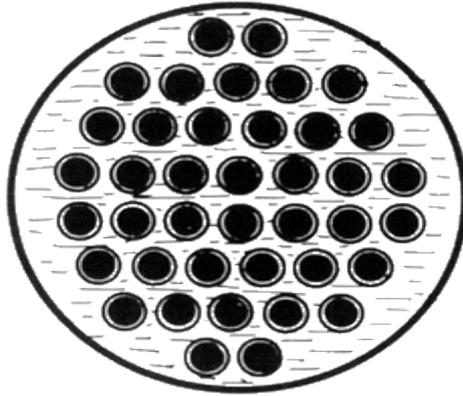


Fig 2-5 : Plaque tubulaire

Généralement Il existe deux différents types de pas des tubes sur les plaques tubulaires (carré et triangulaires). Le pas triangulaire permet de placer environ 10 % de plus de tubes que le pas carré sur une plaque tubulaire de même diamètre, ce qui augmente la qualité de service, c'est le cas de l'échangeur 123C (Fig2-6).

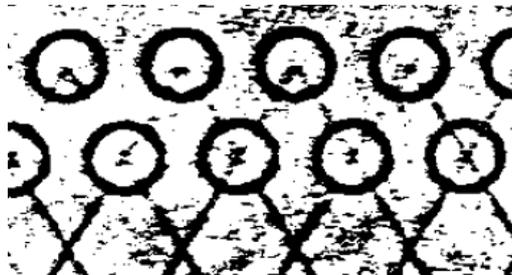


Fig 2-6 : Pas triangulaire au niveau de la plaque tubulaire du 123C

Des chicanes sont installées côté calandre pour orienter le cheminement du fluide, et forcer son contact avec la totalité de la surface des tubes (Fig2-7).

Ces plaques perforées (les chicanes) sont transversales aux tubes où les tubes passent à travers les trous et sont maintenues en place au moyen des tirants et des entretoises.

La coupure de la chicane disposée verticalement où Les chicanes sont placées perpendiculairement à l'axe de faisceau tubulaire.

Leur fenêtre de passage prend la forme de secteur.

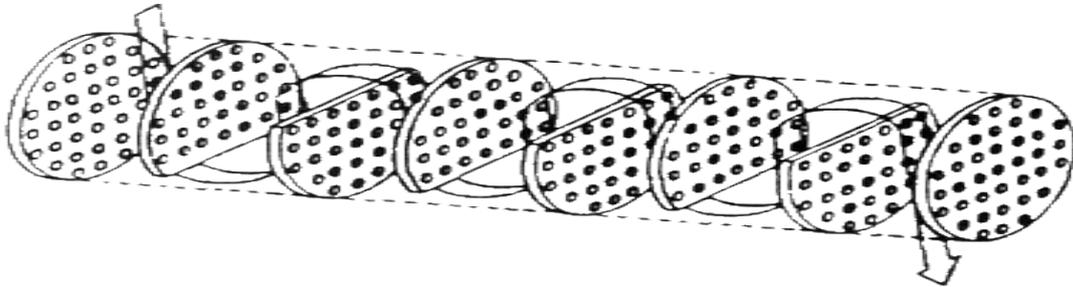


Fig 2-7 : Plaque tubulaires + chicanes

Cet échangeur est constitué d'une passe coté calandre et une passe coté tubes et les deux flux circulent à contre-courant.

Les boîtes de distribution du gaz sont munies de parois étanches pour orienter le fluide vers les tubes appropriés. (Fig 2-8)<sup>[7]</sup>

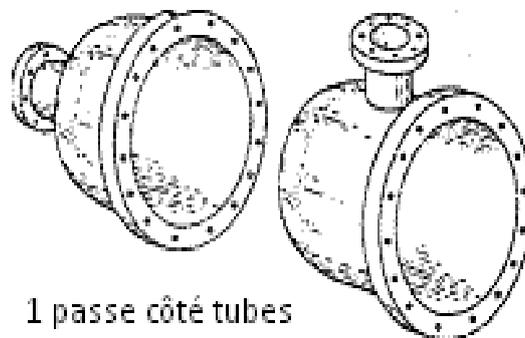


Fig 2-8 : Boites de distribution du gaz

#### 4) Caractéristiques technique et performance de l'échangeur 123-C :

La Norme TEMA définit les principaux types d'échangeurs. Suivant cette norme, la forme de cet échangeur 123C est caractérisée par 3 lettres **DEN**, sur les figures (Fig 2-8) sont représentés les différents types d'échangeurs sur la norme TEMA : <sup>[6]</sup>

- 1ère lettre : **D** pour la boîte de distribution monobloc (soudée sur la calandre).
- 2ème lettre : **E** pour la calandre à une passe.

- 3ème lettre : N pour la plaque tubulaire fixe.

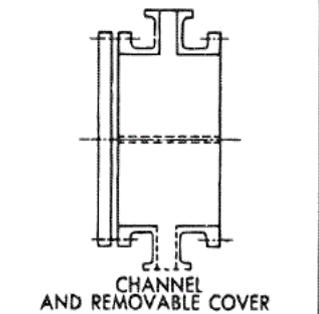
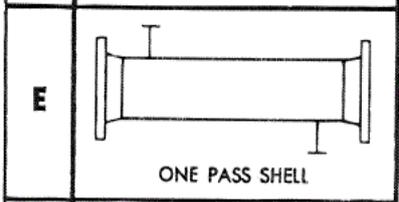
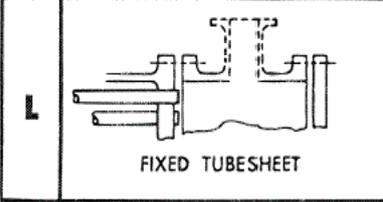
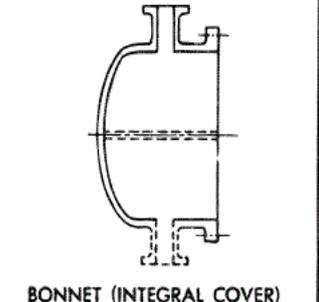
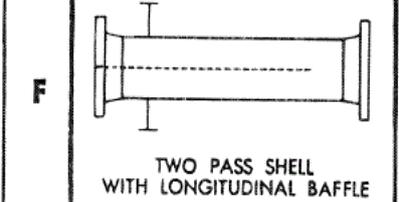
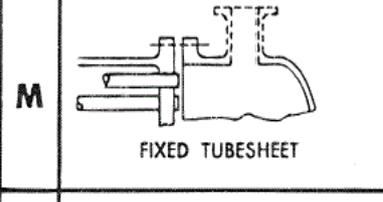
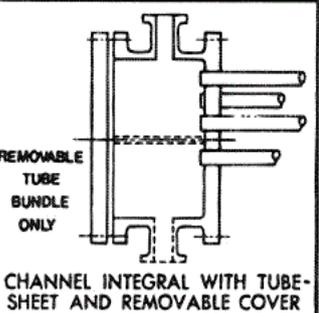
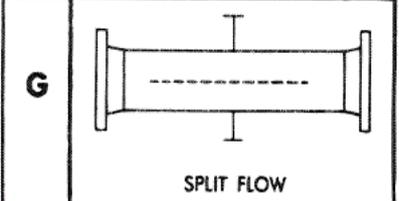
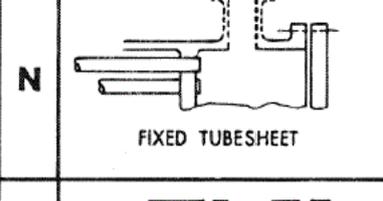
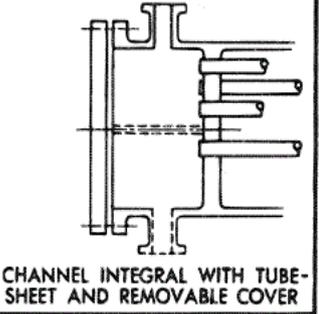
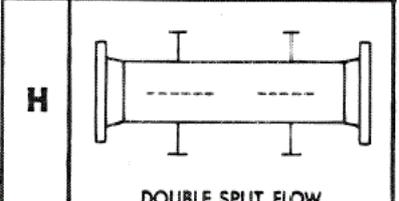
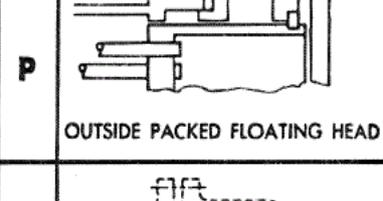
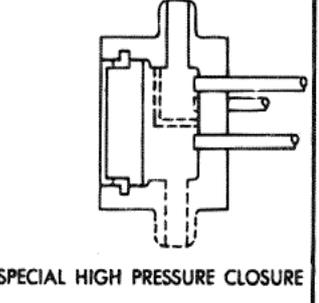
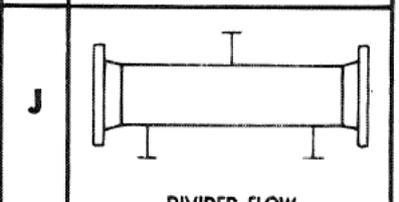
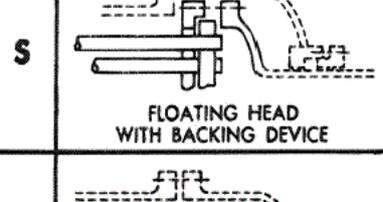
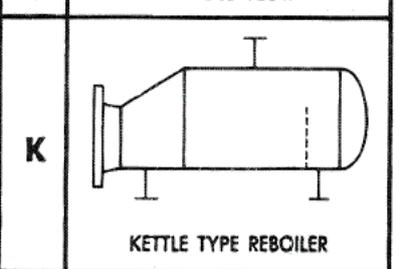
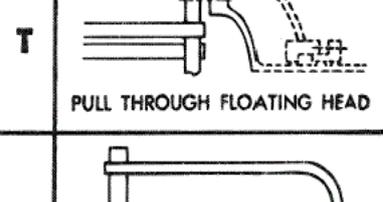
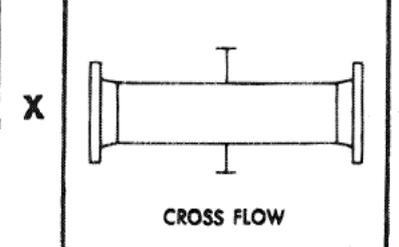
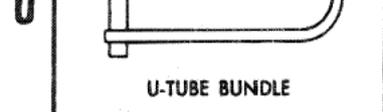
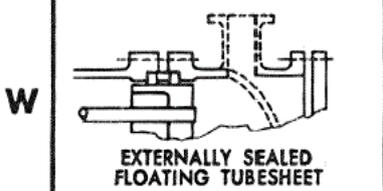
FRONT END STATIONARY HEAD TYPES		SHELL TYPES		REAR END HEAD TYPES	
<b>A</b>	 CHANNEL AND REMOVABLE COVER	<b>E</b>	 ONE PASS SHELL	<b>L</b>	 FIXED TUBESHEET
<b>B</b>	 BONNET (INTEGRAL COVER)	<b>F</b>	 TWO PASS SHELL WITH LONGITUDINAL BAFFLE	<b>M</b>	 FIXED TUBESHEET
<b>C</b>	 REMOVABLE TUBE BUNDLE ONLY CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE-SHEET AND REMOVABLE COVER	<b>G</b>	 SPLIT FLOW	<b>N</b>	 FIXED TUBESHEET
<b>N</b>	 CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE-SHEET AND REMOVABLE COVER	<b>H</b>	 DOUBLE SPLIT FLOW	<b>P</b>	 OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD
<b>D</b>	 SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE	<b>J</b>	 DIVIDED FLOW	<b>S</b>	 FLOATING HEAD WITH BACKING DEVICE
		<b>K</b>	 KETTLE TYPE REBOILER	<b>T</b>	 PULL THROUGH FLOATING HEAD
		<b>X</b>	 CROSS FLOW	<b>U</b>	 U-TUBE BUNDLE
				<b>W</b>	 EXTERNALLY SEALED FLOATING TUBESHEET

Fig 2-9 : table des différentes configurations possibles d'un échangeur de chaleur tubulaire.

4-1) la calandree et les boites de distribution :

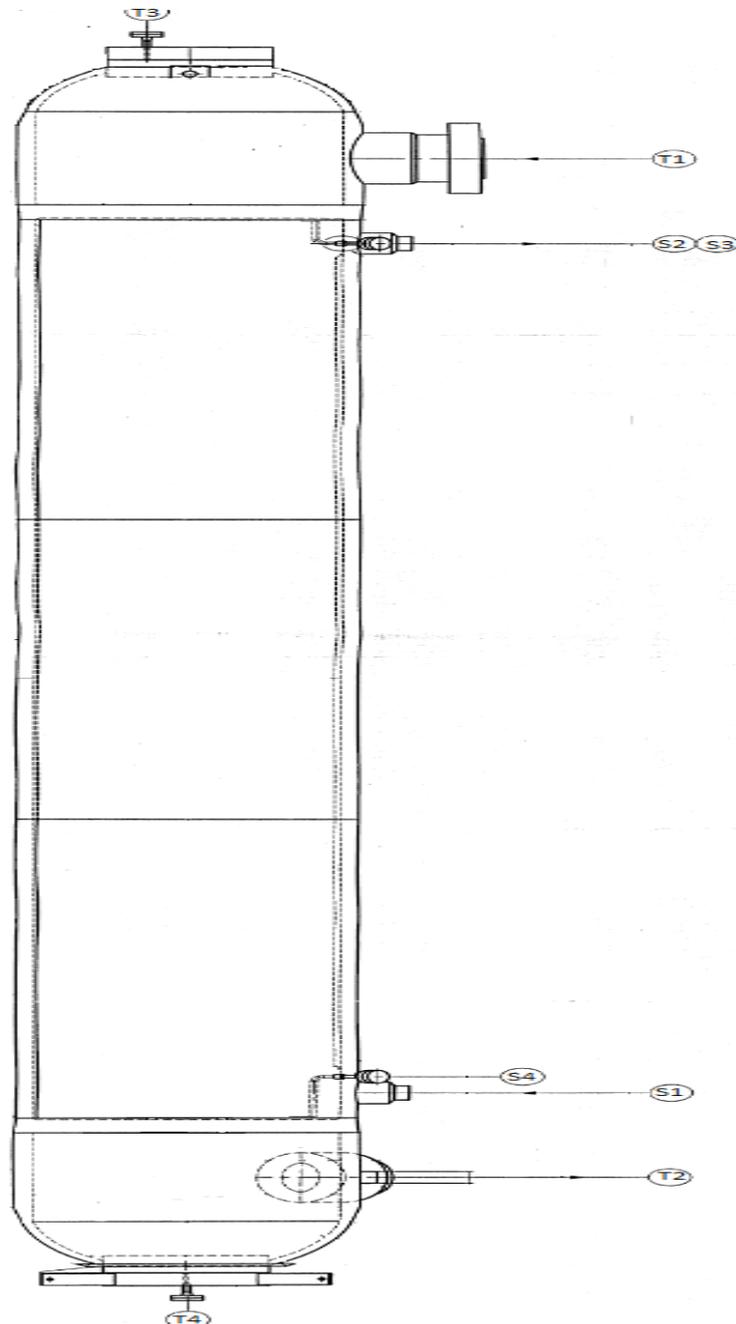


Fig 2-10 : la calandre et les boites de distribution[5]

La calandre prend la forme d'un cylindre construit de trois viroles et comprend une entrée de l'eau de refroidissement (S1) et une sortie de l'eau (S2) et aussi un évent

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES ET PROBLEMES DE L'ÉCHANGEUR 123C

(S3) situé au sommet de la calandre pour faciliter le remplissage total de l'échangeur coté eau, par contre le drain (S4) est utilisée pour faciliter la vidange total d'eau.

De l'autre côté les boites de distribution comprennent une entrée du gaz (T1) partie supérieur et un évent (T3). Une sortie (T2) à la boite inferieur plus un drain (T4).

Tableau 2-1 : matière de construction et dimensions (calandre +boite)

	Matière du corps	Longueur total (mm)	Diamètre intérieur (mm)	Epaisseur (mm)	Diamètre extérieur (mm)	Sur épaisseur de corrosion (mm)	fluide circule
Calandre	acier au carbone avec 1,5 mm de surépaisseur de corrosion	10620 ± 6	1430 ± 3	80	1590	1,5	Eau alimentation chaudière
Boites de distribution	Acier au carbone à 0.5 Mo	4405 ± 6	1430 ± 3	91	1612	1,5	Effluents sur convertisseur

Tableau 2-2 : nomenclature des repères (S) et (T)<sup>[5]</sup>

REP	NB	BRIDES						
		TYP	DN (mm)	∅ EXT (mm)	SERIE (lb)	FACE	MATIERE	OBSERVATION
S1	1	MONO BLOC	150	169	/	/	A105	ENTREE CALANDRE
S2	1	MONO BLOC	150	169	/	/	A105	SORTIE CALANDRE
S3	1	WN	25	33,7	1500	RTJ	A105	EVENT + TAMPON
S4	1	WN	25	33,7	1500	RTJ	A105	BLOWDOWN + TAMPON
T1	1	LWN	400	552	1500	RTJ	A182F1	ENTREE BOITE
T2	1	MONO BLOC	400	407	/	/	A182F1	SORTIE BOITE
T3	1	WN	25	33,7	1500	RTJ	A182F1	EVENT +TAMPON

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES ET PROBLEMES DE L'ECHANGEUR 123C

T4	1	WN	25	33,7	1500	RTJ	A182F1	DRAIN TAMPON	+
----	---	----	----	------	------	-----	--------	-----------------	---

Tableau 2-3 : autres caractéristiques[8]

REP	Désignation	Elévation	N° ISO	T° MAX de service en °C	P MAX de service en bars
S1	Entrée BF	EL 104000	601-B2	130	114.5
S2	Sortie BF	EL 114050	601-B5	274	110
T1	Entrée SG	EL 115050	601-B119	290	136.4
T2	Sortie SG	EL 103000	601-B120	166	135.8

### 4-2) les plaques tubulaires :

On les retrouve aux extrémités de la calandre. Les deux plaques ont une épaisseur de 175 mm qui sont en communication avec des boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau tubulaires. Le matériau utilisé pour ces plaques est l'acier au carbone à 0.5 Molybdène qui est « A182GrF1 » selon ASTM.

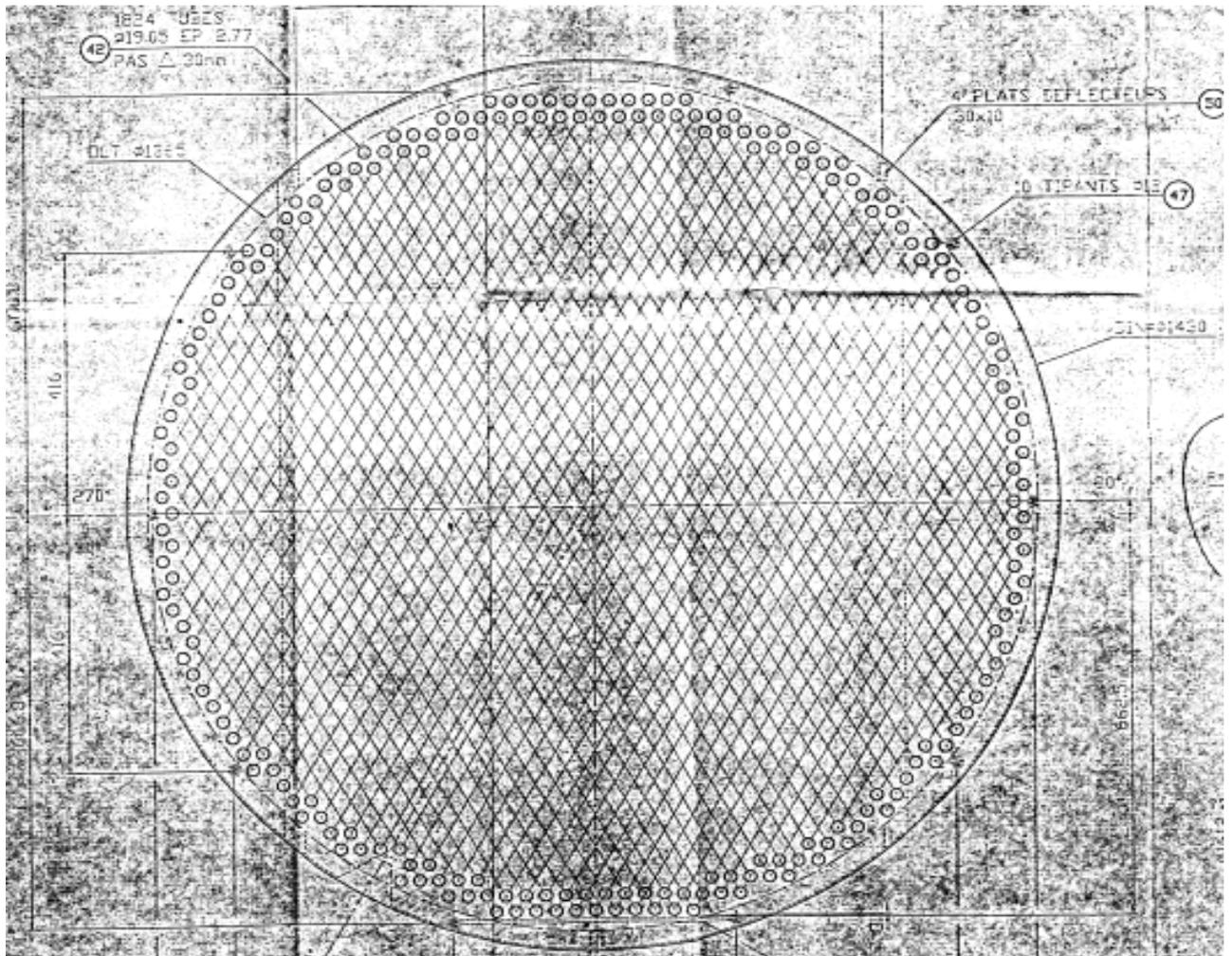


Fig2-11 : Une esquisse détaillée pour les plaques tubulaires[5]



Fig2-12 partie de la Plaque tubulaire supérieure de l'échangeur 123-C

Tableau 2-4 : Caractéristique des plaques tubulaire<sup>[5]</sup>

Matériau	Acier au carbone a 0,5 Mo
Epaisseur (mm)	175
DN (mm)	1430
DLT (mm)	1365
Type des pas	Triangulaire équilatéral
Pas $\Delta$ cote (mm)	30

**4-3) faisceau tubulaire :**

Les échangeurs tubulaires utilisent des tubes comme constituant principal de la paroi d'échange

L'échangeur 123C contient 1775 tubes droits rectilignes de 10973 mm de long, d'un diamètre de 19,05 mm et une épaisseur de 2,77 mm. Le faisceau tubulaire est construit en acier allié, Chrome Molybdène « ASTM A209 T1 » pour résister à des hautes pressions jusqu' à 149,5 bars et des températures très élevées jusqu' à 310 °C.

Les extrémités des tubes sont lisses pour permettre leur insertion dans les plaques tubulaires. Ils sont dudgeonnés dans les plaques tubulaires puis soudés.[5]

Tableau2-5 : caractéristiques techniques des tubes

Nombre des tubes	1775
Longueurs des tubes	10973 mm
Diamètre des tubes	19,05 mm
Epaisseur des tubes	2,77 mm
pression d'étude (bars)	149,5 bars
Pression max de service (bars)	148 bars
Pression d'épreuve (bars)	224,3 bars
Température de calcule (°C)	310 °C
Température max de service (°C)	290/166 °C
Nombre de passe	Une

#### 4-4) Les chicanes :

Ce sont des tôles en forme de segment de 7mm d'épaisseur et de diamètre inférieur au diamètre de la calandre et la plaque tubulaire.

Les chicanes sont dotées des trous de diamètres légèrement supérieurs aux diamètres extérieurs du tube du faisceau pour faciliter le passage de ces derniers lors de leurs montages.[6]

Entre les deux plaques tubulaires on trouve un ensemble de 38 chicanes. La première chicane est positionnée à 619 mm de la première plaque tubulaire. Les chicanes sont séparées ente eux d'un espace de 260 mm, ce qui forme 37 espaces.[5]

Le rôle de chicane est de maintenir les tubes droits et éviter leur fléchissement, vibration et frottement.

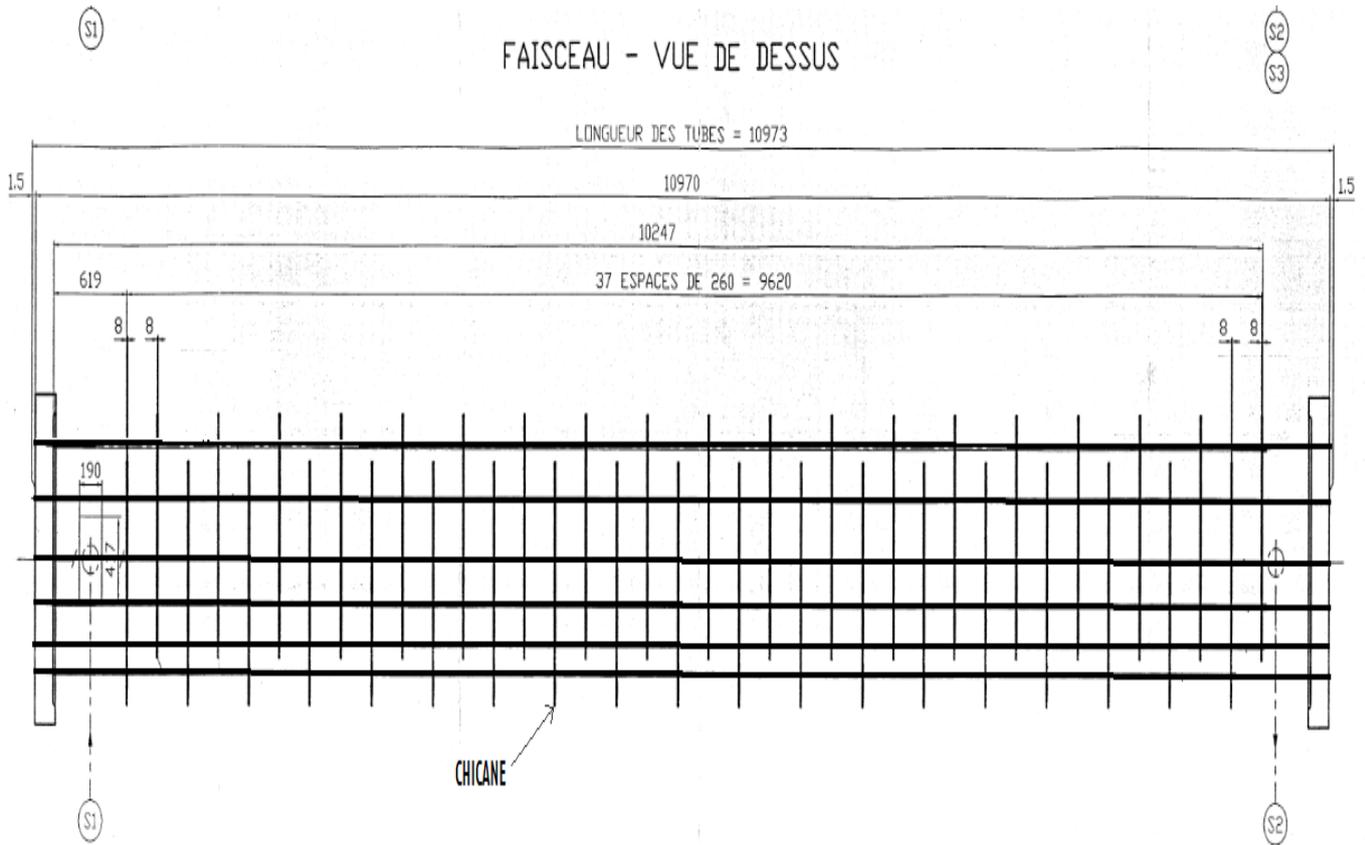


Fig2-13 : Emplacement des chicanes par rapport aux tubes et plaques tubulaires[5]

#### 4-5) Les tirants et les entretoises :

Les plaques tubulaires et les chicanes sont reliées et maintenues à l'intervalle voulu par des tirants supportant des tubes entretoises (Fig 2-13). Les tirants sont filetés aux deux extrémités, ils sont vissés sur la plaque tubulaire coté boîte par l'une de ces extrémités et reliés par écrous à la dernière chicane rencontrée ou à une chicane spéciale appelée plaque support, à l'autre extrémité.

La plaque-support en général peut être avec une ouverture centrale, ou être constituée par un segment circulaire intéressant 3 ou 4 tirants au moins.

A l'endroit de l'entrée du fluide dans la calandre les tubes sont protégés par une plaque, soudée aux entretoises supérieures, formant un déflecteur (Fig 2-14). [6]

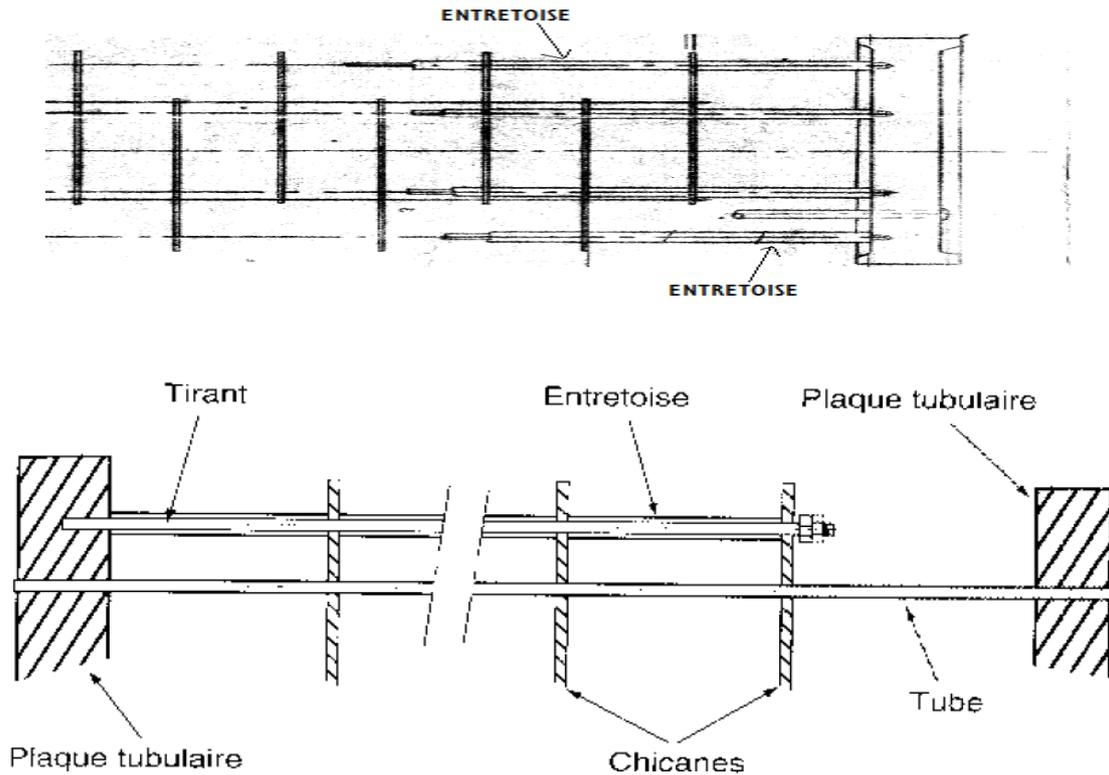


Fig 2-13 : emplacement des tirants et entretoises[5]

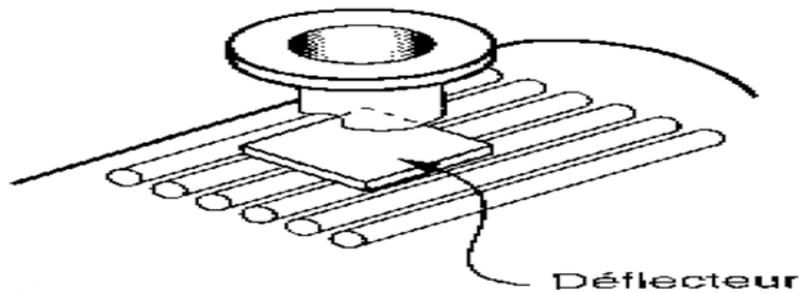


Fig 2-14 : déflecteur

Pour subvenir aux conditions des paramètres de fonctionnement (températures et pression) et jouer son rôle stratégique au niveau de la section synthèse de l'unité de production d'ammoniac, le 123C et un équipement soumis à un contrôle non destructif décennal pour sa maintenance afin de s'assurer de son bon état de fonctionnement.

En effet depuis quelques années le 123C a connu des problèmes à répétition comme on le verra ci-après.

### 5) Problèmes de 123C :

Lors des arrêts programmés de l'unité d'ammoniac plusieurs équipements stratégiques doivent être inspectés, l'échangeur **123 C** en fait partie.

Dans ce chapitre on va relater les problèmes rencontrés au niveau de cet échangeur 123C et aussi les différents modes d'inspection et réparation pour assurer le bon fonctionnement de l'appareil.

L'inspection des équipements est réalisée par les ingénieurs de l'unité. Mais la dernière a été réalisée en 2015 par Vinçotte qui est un organisme français agréé suite à un problème de présence d'eau dans l'ammoniac avec des pourcentages élevés. La présence de l'eau dans l'ammoniac a été causée par des fuites d'eau au niveau de l'échangeur 123C. Ce dernier a été mis en exploitation en 1996 et il est toujours en service jusqu'à aujourd'hui.

Il ressort de l'inspection qu'une fissure très importante a été localisée sur le joint de soudure de la plaque tubulaire supérieure avec la boîte d'entrée du gaz synthétique aussi certaines fissures sur joints des soudures tube avec les plaques tubulaires, ce problème de fissuration des soudures et des parois est due à la fragilisation du métal par l'hydrogène ( $H_2$ ) présent dans le fluide (corrosion par hydrogène).



Fig2-14 : la présence de corrosion est claire au niveau des joints de soudure de la plaque tubulaire supérieure avec la virole (boîte de distribution).[9]

### 5-1) Contrôle et réparation des défauts au niveau de 123 C

Lors de l'inspection visée précédemment de l'état de 123C, des contrôles non destructifs (CND) ont été réalisés par un test visuel et un autre pneumatique et hydraulique permettant l'identification des différents problèmes.

La procédure consiste à suivre les deux étapes principales suivantes :

#### A) Soudure circulaire de la plaque tubulaire avec le fond supérieur :

La réparation des tubes fuyards nécessite d'abord des tests pour détecter les points de fuite ensuite une série de manœuvres (en 9 points) comme montré à-après.

#### A-1) Préparation de l'équipement:

Avant toute intervention pour une réparation de l'échangeur il faut prendre toutes les mesures sécuritaires préventives pour éviter tout accident ou incident qui peut être causé au personnel intervenant ou à l'installation.

Et pour faire une intervention sans risque ou danger il faut respecter les étapes suivantes :

A-1-1) Inertiser le circuit gaz synthèse côté entrée et sortie du 123C.

A-1-2) Installer les brides pleines côté entrée et côté sortie gaz synthèse ( $T_1$  et  $T_2$ )

A-1-3) Procéder à la coupe des conduites d'entrée et sortie eau d'alimentation de chaudière ( $S_1$  et  $S_2$ ).

A-1-4) Ouverture des boîtes entrée et sortie gaz synthèse.

A-1-5) Nettoyage des plaques tubulaires entrée et sortie.

#### A-2) Test d'étanchéité et contrôle non destructif (Ressuage, Réplique)

- Un test pneumatique a été réalisé à la pression de 03 bars maintenu 01h, le résultat du test est :

\* 01 fuite sur ancien bouchon d'un tube fuyard précédemment et 01 fuite au niveau de l'assemblage (soudé et dudgeonné).<sup>[9]</sup>

- Un contrôle CND par Vinçotte au niveau des deux plaques tubulaires le résultat du contrôle est :

\* détection d'une fissuration sur le cordon circulaire (joint de soudure) de la plaque tubulaire supérieure en liaison avec virole( boîte d'entrée gaz), comme elle est montrée sur la figure (Fig 2-15)

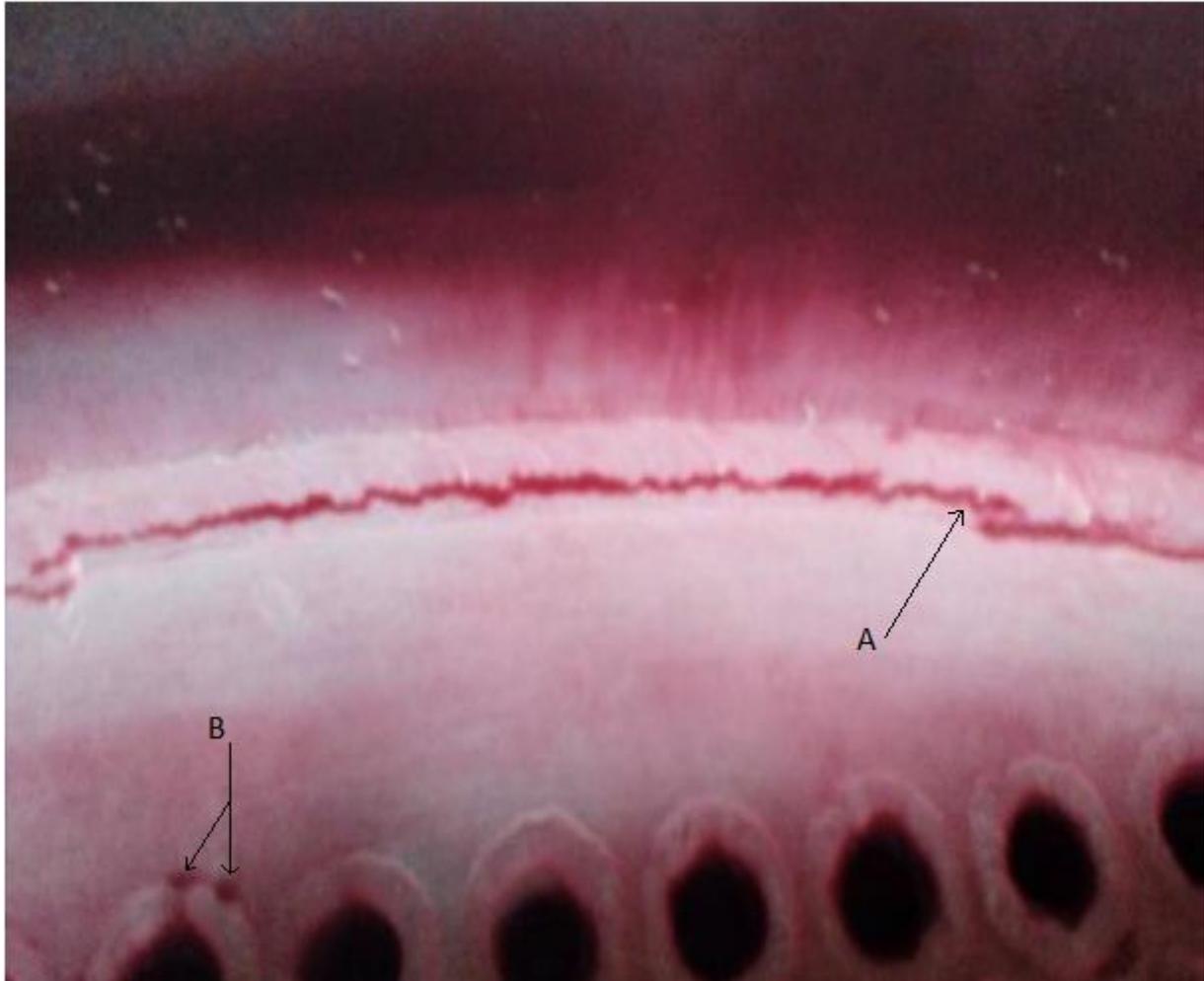


Fig 2-15 : Le contrôle par ressuage montre l'ampleur de la fissure sur joint soudure plaque supérieur avec virole (A) et on peut remarquer aussi certaines fissures sur joints des soudures tube avec plaque (B).

Les produits utilisés pour effectuer ce test appelés MPI fluorescent (Magneticparticle Inspection) où le produit rouge est le pénétrant et le blanc est le révélateur.



Fig2-16 :Contrôle par ressuage montre des fissures superficielles sur le fond supérieur de la calandre.[9]



Fig2-17 :Contrôle par ressuage montre des fissures sur le fondinferieur de la calandre.[9]

A-3)Dégazage :

Le dégazage des plaques tubulaires est recommandé pour chasser l'hydrogène présent dans les fissures et les pores des soudures et éviter son explosion lors des réparations (par soudage).

L'opération de dégazage se fait selon la recommandation préconisée par l'organisme agréé, en respectant la procédure suivante :

- a) Montée libre jusqu' à 300 °C avec des résistances chauffantes.
- b) Montée à 100 °C/h jusqu' à 350 °C.
- c) Palier à 350 °C pendant 6 à 8 heures pour avoir une échauffe homogène de la plaque.
- d) Descente de 100°C/h jusqu' à 300°C.
- e) Descente libre jusqu' à température ambiante

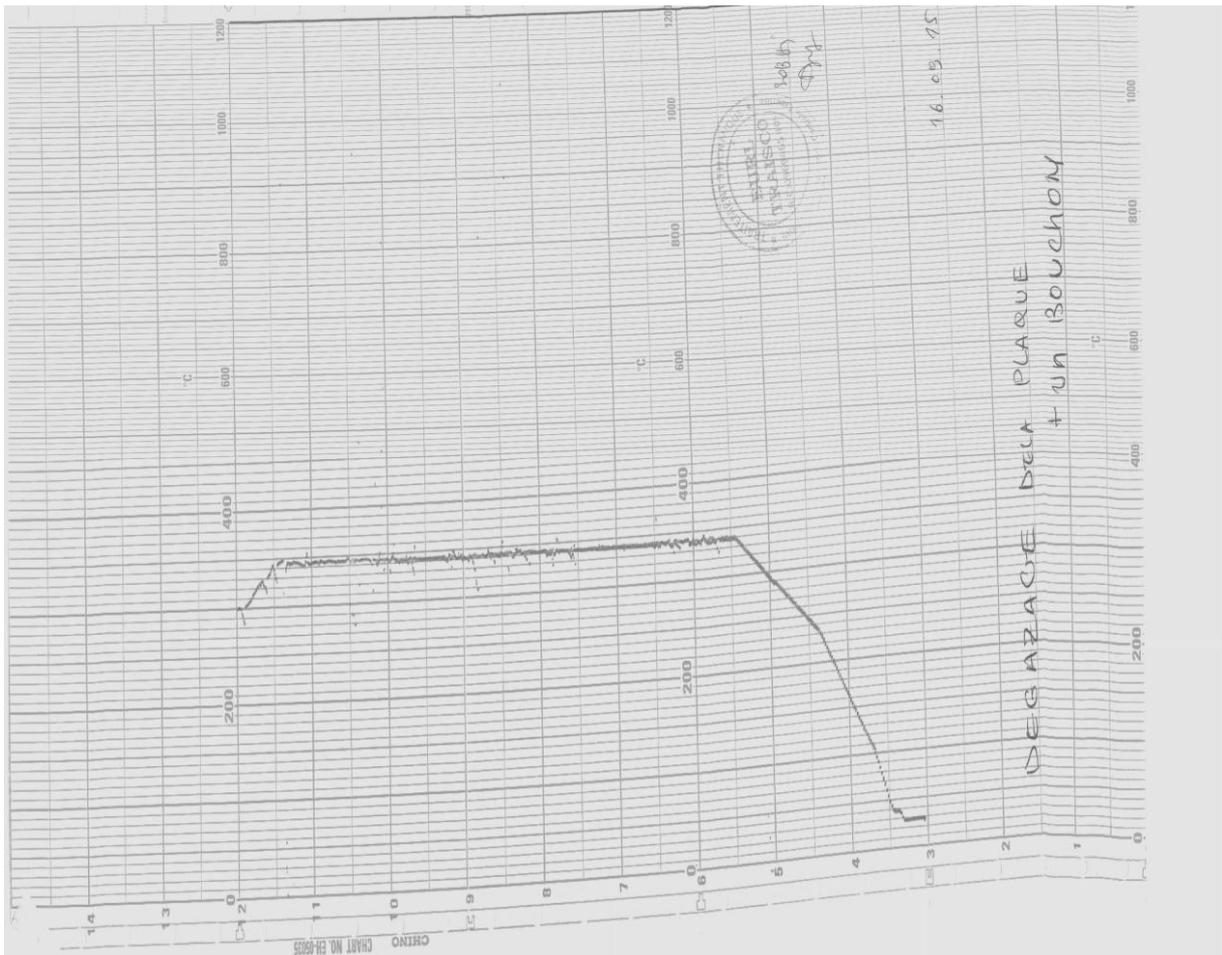


Fig2-18 : courbe de dégazage des plaques tubulaires supérieur et inférieur.[9]

A-4) meulage de la soudure jusqu' à élimination des défauts.

A-5) Contrôle par ressuage après meulage de la soudure.

A-6) Préchauffage en augmentant la température de la plaque jusqu' à 150 °C

- Préchauffage de la plaque tubulaire supérieure avant soudage, puis réparation de la fissure et le bouchon du tubes fuyard auparavant par soudage.

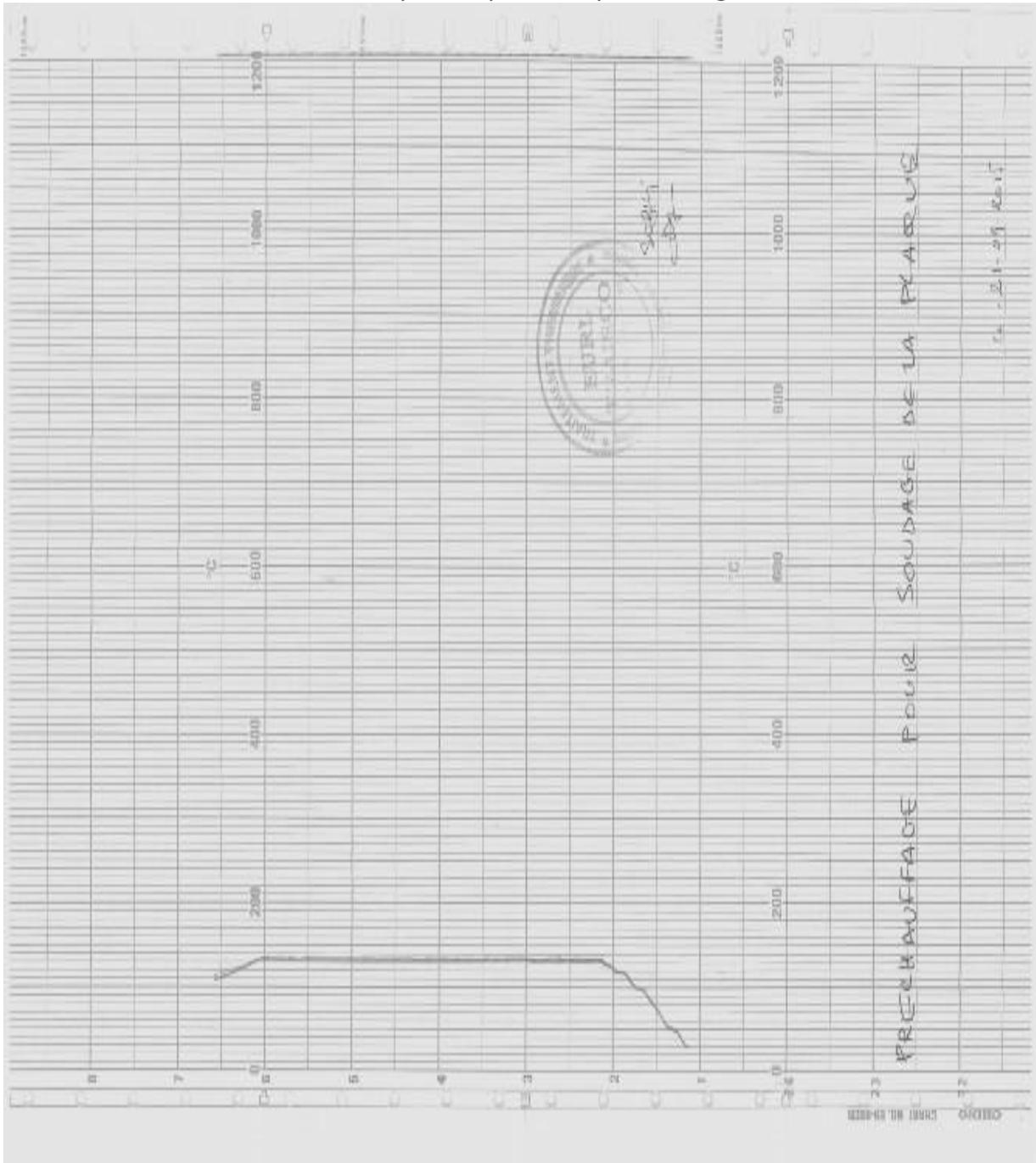


Fig2-19 : courbe de préchauffage de la plaque tubulaire pour soudage.[9]

**A-7) Rechargement à l'électrode.**

**A-8) Refroidissement air calme sous calorifuge.**

**A-9) contrôle par ressuage après refroidissement complet.**

Un autocontrôle (ressuage) est réalisé lors du défoncement afin de s'assurer de l'élimination de la fissure.

Après l'élimination de ce problème une autre série de contrôle et réparation commence pour résoudre les problèmes du faisceau tubulaire (fuites localisées sur les joints de soudure des tubes avec les plaques tubulaires).

**B) Soudure tubes et bouchons sur les plaque tubulaire :**

Après la fin des travaux de soudure et le refroidissement de l'équipement un test d'étanchéité pneumatique et reconduit à une pression de 03 bars.

Pour plus de confirmation sur l'étanchéité du faisceau tubulaire, onprocède à des tests d'étanchéité hydraulique.

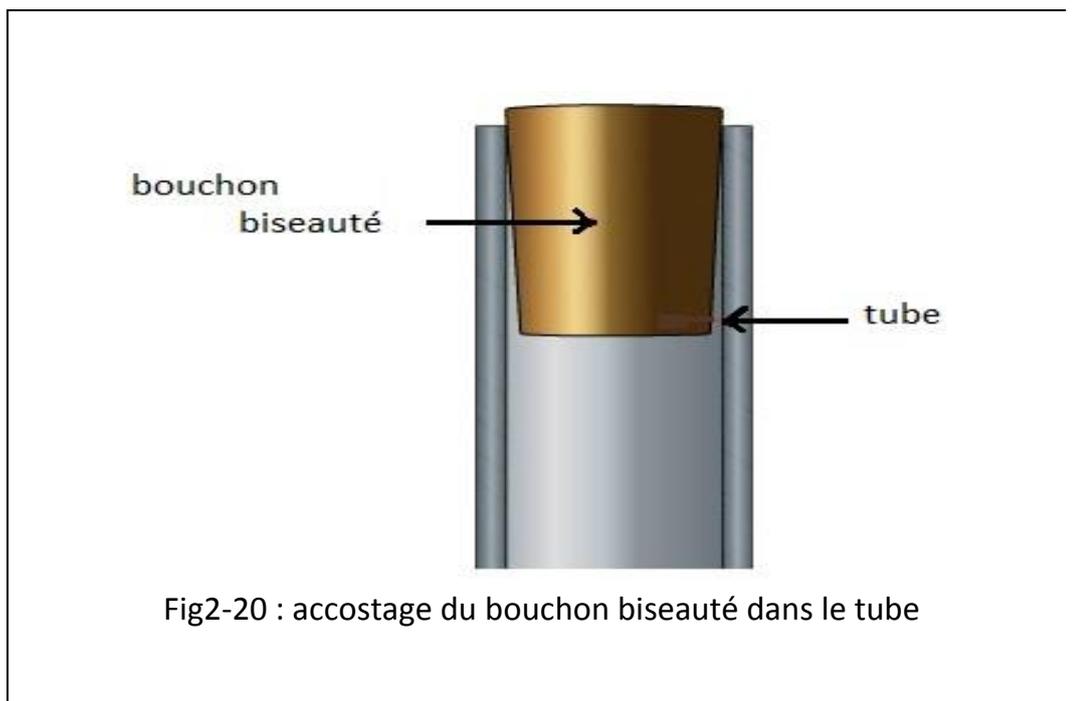
Tableau 2-6 : tests hydrauliques appliqués pour la détection des fuites dans les joints de soudure des tubes avec la plaque tubulaire :[9]

Test	Pression (bars)	Nombre des fuites sur soudure tube à plaque	Situations
1	45	23	Réparée puis reconduction du test
2	65	14	Réparée puis reconduction du test
3	100	26	Réparée puis reconduction du test
4	100	07	Réparée puis reconduction du test
5	110	17	Réparée puis reconduction du test
6	110	08	Réparée puis reconduction du test
7	110	07	Réparée puis reconduction du test
8	110	RAS	/

Entre chaque opération de réparation des tubes fuyards on procède d'abord au dégazage des plaques tubulaires (supérieure et inférieure), ensuite on réalise un meulage qui consiste à éliminer les vieilles soudures ensuite on préchauffe le tube et la plaque tubulaire avec la résistance chauffante à 150°C pour pouvoir procéder au soudage des tubes à la plaque tubulaire et on contrôle à la fin par ressuage après refroidissement complet pour assurer l'élimination des problèmes.

Mais aussi en ce qui concerne le bouchonnage d'un tube du faisceau tubulaire, les étapes sont les suivantes : [9]

- Test d'étanchéité
- Repérage du tube fuyard
- Dégazage des plaques tubulaires
- Accostage et soudage des 2 bouchons biseauté



- Contrôle par ressuage des soudures

C) CND général après fin des travaux :

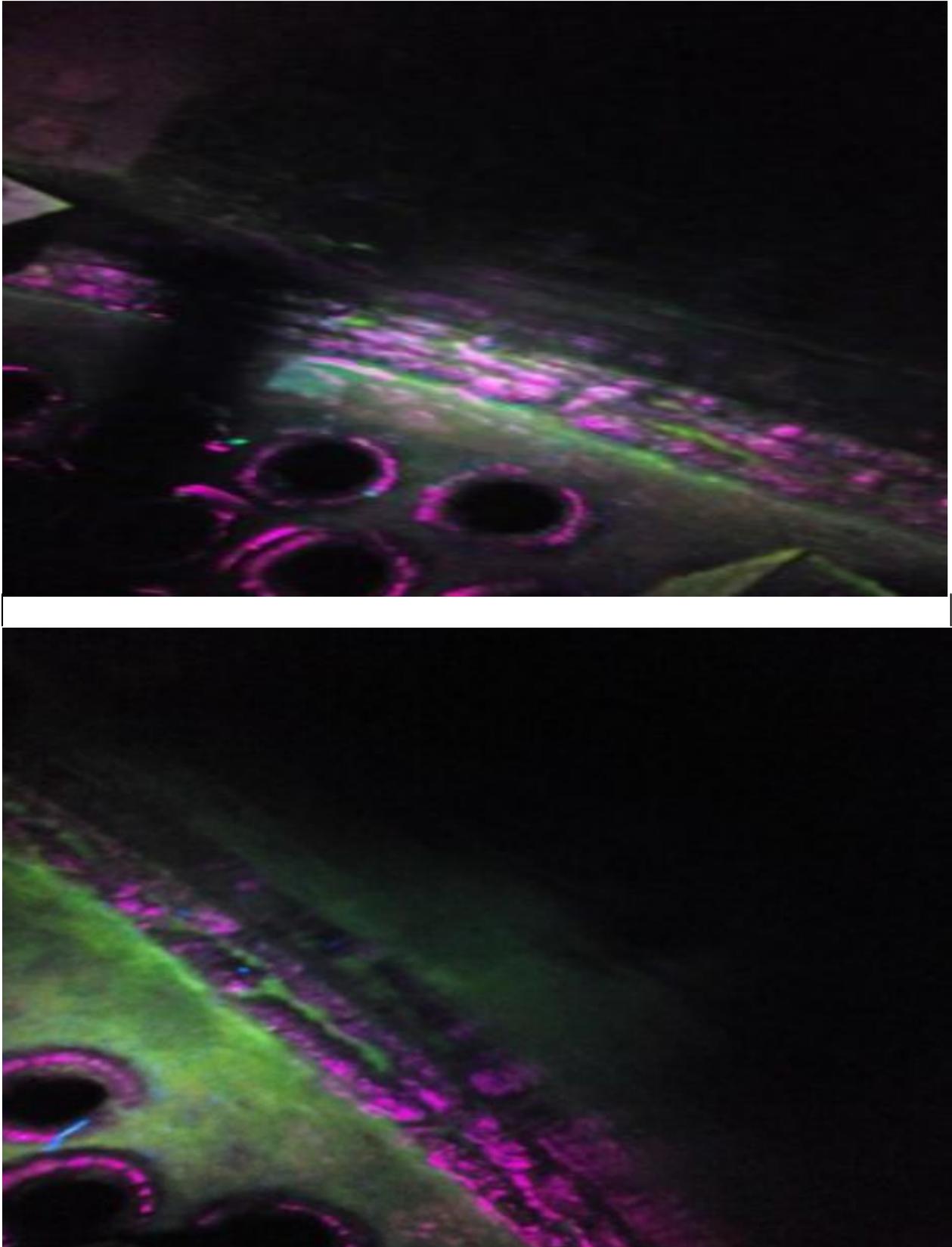


Fig2-21: Deux photos après le contrôle par MPI fluorescent réalisé au niveau de la plaque tubulaire supérieure sur les réparations ne montre aucun défaut.[9]



Fig2-22 : La nouvelle soudure de plaque tubulaire supérieure avec la virole et aussi avec certains tubes après réparation.[9]

### 6) Conclusion :

Le bon fonctionnement de l'échangeur 123C demande des interventions complexes et de la main d'œuvre qualifiée afin de garantir un produit final (ammoniac) sans présence d'excès d'eau, les interventions durent une quinzaine de jours et nécessitent l'arrêt total de l'unité, ce qui constitue un manque à gagner important pour l'entreprise Fertial. L'ammoniac qui est un produit concurrentiel sur le marché international, et qui constitue une source de rentrée de devise importante pour le pays. D'autre part ces réparations des échangeurs demandent l'intervention de techniciens étrangers coûtant de l'argent à l'entreprise. C'est pourquoi le respect des paramètres opératoires au cours de fonctionnement des équipements garantit une durée de vie optimale de ces derniers.

## 1) Introduction

Difficile d'être exhaustif sur la description technologique des échangeurs tant la diversité de ces appareils et de leurs variantes en fonction des constructeurs est importante.

Dans ce chapitre on va vérifier les performances de notre échangeur 123C de type faisceau-calandre d'une configuration méthodique. Avec une passe coté tube et une passe coté calandre.

La configuration dite méthodique est celle où les fluides circulent à contre-courants. On l'appelle méthodique car c'est cette configuration qui permet d'obtenir les meilleures performances d'échangeurs.

## 2) Données du calcul

Tableau3-1 : caractéristiques des fluides :

Propriétés	Fluide coté calandre (froid)	Fluide coté tube (chaud)
<b>Fluide</b>	<b>Eau de chaudière</b>	<b>Gaz de synthèse</b>
<b>Température d'entrée °C</b>	130	290
<b>Température de sortie °C</b>	268	166
<b>Débit massique kg/h</b>	170118	287647
<b>Débit volumique m<sup>3</sup>/h</b>	221,219	6976,158
<b>Masse volumique kg/ m<sup>3</sup></b>	769	41,4426
<b>Conductivité thermique kcal/(m h°C)</b>	0,5137	0,1212
<b>Viscosité dynamique cP</b>	0,134	0,02205
<b>Chaleur spécifique kcal/(kg.°C)</b>	0,991	0,7021
<b>Quantité de chaleur échangée (design) (kcal/h)</b>	25,12. 10 <sup>6</sup>	25,12. 10 <sup>6</sup>

**b) caractéristiques de la calandre de l'échangeur faisceau-calandre 123C :**

Tableau3-2 : caractéristiques de la calandre de l'échangeur 123C :[5]

<b>Coté calandre</b>	
Diamètre intérieur mm	1430
Espacement des chicanes mm	260
Nombre de passes	Une
Epaisseur des chicanes (mm)	7
Perte de charge calculée (bar)	0,69
Nombre de passes	Une
Diamètre du segment occupé par le faisceau tubulaire (DLT) (mm)	1365

Tableau3-3 : caractéristiques des tubes de l'échangeur 123C :[5]

<b>Coté tube</b>	
Nombre des tubes	1775
Conductivité thermique kcal/(hm°C)	37,4724
Longueur des tubes mm	10620
Pas triangle de cote mm	30
Diamètre des tubes mm	19,05
Epaisseur des tubes mm	2,77
Nombre de passes	Une
Perte de charge calculée (Bar)	0,26

**3) Application :**

Dans cette partie, nous allons déterminer la quantité d'énergie échangée entre les fluides chauds et froids qui nous permettra d'effectuer les différents calculs de l'échangeur 123C et les comparer aux données du design. La méthode de calcul est prise de livres P. Whuithier « Raffinage et génie chimique, tome I et tome II »<sup>[10][11]</sup>.

**3-1) Expression du flux échangé**

Quel que soit le type d'appareil utilisé, si l'on prend en considération que les conditions d'entrée et de sortie des deux fluides, il est possible d'établir le bilan thermique global de l'appareil en écrivant que la quantité de chaleur  $\phi$  perdue par le fluide chaud est égale à celle prise par le fluide froid, si l'on néglige les pertes thermiques.

$$\phi = \dot{M}.C_{p1} (T_1 - T_2) = \dot{m}.C_{p2} (t_2 - t_1) \dots\dots\dots 1^{[10]}$$

Où :

$\dot{M}$  est le débit massique du fluide chaud.

$\dot{m}$  est le débit massique du fluide froid.

$C_{p1}$  est la chaleur spécifique du fluide chaud.

$C_{p2}$  est la chaleur spécifique du fluide froid.

$T_1$  et  $T_2$  sont les températures d'entrée et de sortie du gas respectivement coté tube.

$t_1$  et  $t_2$  sont les températures d'entrée et de sortie d'eau respectivement coté calandre.

Les débits  $q_{c1} = \dot{M}.C_{p1}$  et  $q_{c2} = \dot{m}.C_{p2}$  sont appelés les débits calorifiques des deux fluides en (W/°C).<sup>[10]</sup>

Le flux de chaleur peut donc finalement s'écrire :

$$\varphi = q_{c1}(T_1 - T_2) = q_{c2}(t_2 - t_1) \dots \dots (2)^{[10]}$$

d'après l'équation (1)

$$\varphi = \dot{M}.C_{p1} (T_1 - T_2)$$

$$\varphi = 287647. 0,683 (290 - 166)$$

$$\varphi = 23,36. 10^6 \text{ kcal/h}$$

par ailleurs, on peut appliquer l'équation de Fourier à l'ensemble de l'appareil :

$$\varphi = A \frac{\Delta T_{ml}}{R} = U. A. \Delta T_{ml} \dots \dots (3)^{[11]}$$

Où :

A : est la surface totale d'échange offerte par l'appareil.

U : le coefficient du transfert de chaleur global.

$\Delta T_{ml}$  : différence de température moyenne logarithmique entre les deux fluides.

R : résistance thermique global.

Remarque : Pour un appareil donné dont la surface A est une caractéristique géométrique calculable, les valeurs des termes U et  $\Delta T_{ml}$  sont en fonction de la disposition interne des tubes, du nombre de passe et des caractéristiques de l'écoulement des tubes.

La géométrie des échangeurs réels fait que leur fonctionnement s'écarte de celui d'un échangeur parfait à contre-courant. Leur efficacité s'en trouve réduite, et ceci est représenté dans le calcul par un facteur correctif de la différence de température moyenne. L'équation prédisant l'intensité du transfert thermique devient donc :

$$\varphi = U \cdot A \cdot F \cdot \Delta T_{ml} \dots \dots (4)_{[11]}$$

avec :

$\varphi$  : quantité de chaleur échangée (Watts)

F : facteur correctif de la différence de température (sans dimension)

U : coefficient de transfert thermique global (W/(m<sup>2</sup>°C))

A : surface de transfert thermique (m<sup>2</sup>)

$\Delta T_{ml}$  : différence de température logarithmique moyenne entre le fluide chauffant et le fluide chauffé (°C).

Ce facteur correctif dépend de la géométrie de l'échangeur mais aussi du profil de température. Celui-ci est représenté par deux facteurs généralement nommés R et P (dans la littérature anglo-saxonne), dont les définitions sont les suivantes :

\* R correspond au rapport des débits de capacité calorifiques des fluides

\* P correspond au rendement de chauffage ; si le fluide côté tubes sort de l'échangeur à la température d'entrée du fluide côté calandre (chauffage maximum possible), P = 1.

Dans notre cas ou on a une passe coté tube et une passe coté calandre F=1.

3-2 Différence de température logarithmique moyenne(DTLM)

L'échange s'effectue à contre-courant :

$$T_1 = 290 \text{ °C}$$

$$T_2 = 166 \text{ °C}$$

$$t_1 = 130 \text{ °C}$$

$$t_2 = 268 \text{ °C}$$

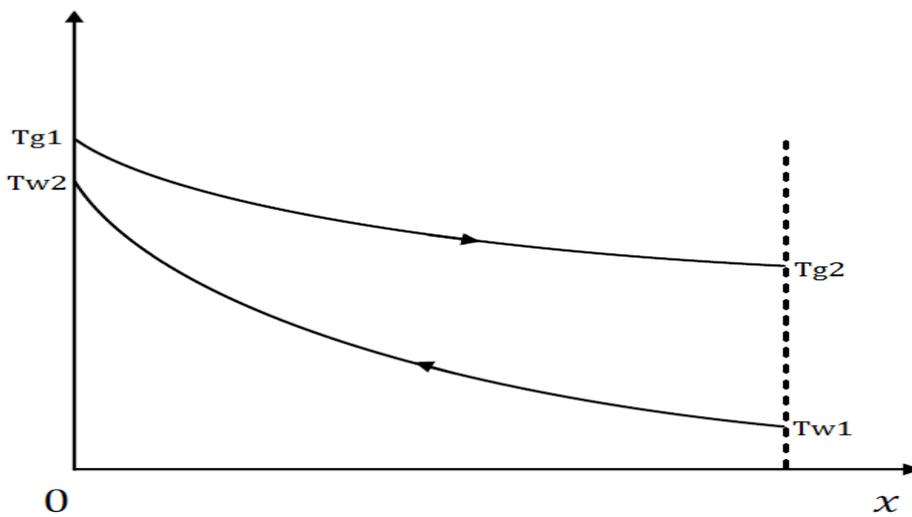


Fig 3-1 : Graphe montre les variations des températures dans l'échangeur (écoulement à contre-courant)

$$DTLM = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \dots \dots \dots (4)[11]$$

$$DTLM = \frac{(290 - 268) - (166 - 130)}{\ln \frac{(290 - 268)}{(166 - 130)}}$$

$$DTLM = 28.42 \text{ °C}$$

### 3-3) Coefficient global d'échange pour l'échangeur 123C

Le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid est la résultante de trois phénomènes successifs:

- Convection entre le fluide chaud et la face externe de la paroi solide.
- Conduction à travers cette paroi solide.
- Convection entre la face interne de la paroi solide et le fluide froid.

Le coefficient d'échange d'un échangeur U est donné par la formule suivante :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + R_s + \frac{1}{h_2} + \frac{e}{\lambda}} \dots \dots \dots (5)[11]$$

$h_1$  et  $h_2$  : coefficients d'échange correctifs locaux, calculés sur la base de corrélations et de nombres adimensionnels de **Reynolds** (Re), **Prandtl** (Pr), le **Nusselt** (Nu).

$e$  : épaisseur de la paroi en m

$\lambda$  : conductivité thermique de la paroi en W/°C/m

$R_s$  : résistance due à l'encrassement de la paroi

L'obtention de la valeur U permet le calcul de la surface et les dimensions de l'échangeur.

#### 3-3-1) Calcul du coefficient d'échange h coté tube

On a :

$$Nu_1 = \frac{h_1 D_i}{\lambda_1} \dots \dots (6)[11]$$

Donc :

$$h_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{D_i}$$

#### 3-3-1-a) vitesse massique du coté tube (fluide chaud)

$$G_t = \frac{M}{A_t \cdot N_t} \dots \dots (7)[11]$$

Où :

$A_t$  : section de passage du tube.

$N_t$  : nombre des tubes.

3-3-1-b) Section de passage coté tube

$$A_t = \frac{\pi}{4} (Di)^2 \dots \dots (8)[11]$$

$$A_t = \frac{\pi}{4} (13.51 * 10^{-3})^2$$

$$A_t = 1.43. 10^{-4} m^2$$

Donc :

$$Gt = \frac{287647}{1,43. 10^{-4}. 1775}$$

$$Gt = 1133249.27 \text{ kg}/(\text{h. m}^2)$$

3-3-1-c) Nombre de Reynolds

$$0.0212 \text{ Cp} = 0.07938 \text{ Kg}/\text{m.h}$$

$$Re_1 = \frac{Gt. Di}{\mu_1} \dots \dots (9)[11]$$

$$Re_1 = \frac{1133249,27. 13,51. 10^{-3}}{0.07996}$$

$$Re_1 = 200482,16$$

Re = 200482,16 > 10000 donc le régime est turbulent

Donc :

$$Nu_1 = 0,018 Re_1^{0,8}. Pr_1^{0,3} \dots \dots (10)[11]$$

3-3-1-d) Nombre de Prandtl

$$Pr_1 = \frac{C_{p1} \cdot \mu_1}{\lambda_1} \dots \dots (11)[11]$$

$$Pr_1 = \frac{0,7021 \cdot 0,0793}{0,1212}$$

$$Pr_1 = 0,46$$

$$Nu_1 = 0,018 Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,3}$$

$$Nu_1 = 0,018 \cdot 200842,16^{0,8} \cdot 0,46^{0,3}$$

$$Nu_1 = 249,1$$

$$h_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{D_i}$$

Donc :

$$h_1 = \frac{249,1 \cdot 0,1212}{13,51 \cdot 10^{-3}}$$

$$h_1 = 2234,8 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

### 3-3-2) Calcul de coefficient $h_2$ coté calandre

Méthode de Donohue :

Donohue prend en considération l'espacement entre chicanes pour définir la valeur de la vitesse massique transversale  $G_{ct}$  et la hauteur sous chicane pour calculer une vitesse massique longitudinale  $G_{cl}$ . [11]

Ensuite, il définit une vitesse massique moyenne  $G_c$ , telle que :

$$G_c = \sqrt{G_{ct} \cdot G_{cl}} \dots \dots (12)[11]$$

$$Nu_2 = \frac{h_2 \cdot D}{\lambda_2} = 0,22 Re_2^{0,8} \cdot Pr_2^{0,3} \dots \dots (13)$$

$$Nu_2 = 0,22 \left( \frac{D \cdot G_c}{\mu_2} \right)^{0,8} \cdot \left( \frac{c_{p2} \cdot \mu_2}{\lambda_2} \right)^{0,3} \dots \dots (14)$$

D : diamètre extérieur des tubes du faisceau.

#### 3-3-2-a) Vitesse massique coté calandre

##### a-1) Vitesse massique transversale $G_{ct}$ :

La vitesse massique transversale est calculée pour l'aire de passage maximale, c'est-à-dire dans la section équatoriale de l'échangeur :

$$G_{ct} = \frac{\dot{m}}{a_{cT}} \dots \dots (15)[11]$$

Soit B, l'espacement des chicanes, P le pas des tubes et  $D_c$ , le diamètre intérieur de la calandre. L'aire de passage  $a_{cT}$  entre deux chicanes varie selon l'arrangement des tubes selon la figure (Fig 3-2).

Le tableau 3-4 donne les valeurs de  $a_{cT}$ , relatives à diverse dispositions.

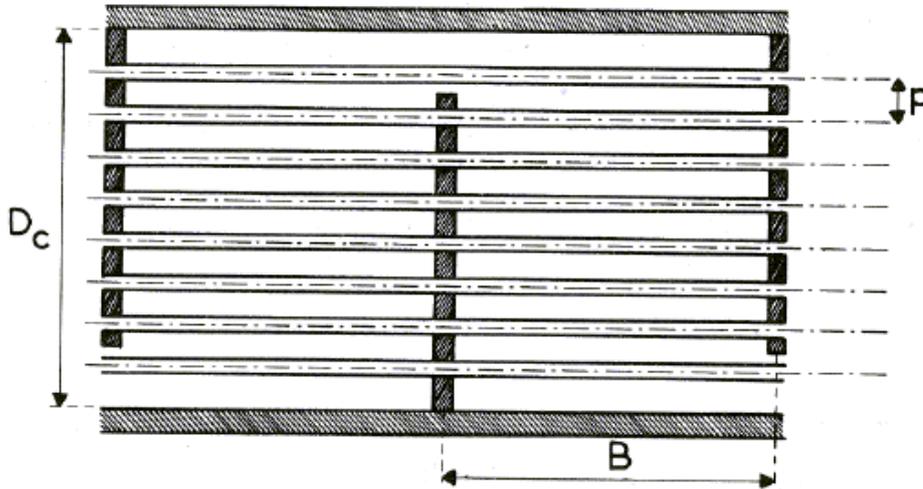


Fig3-2 : Aire de passage transversale entre deux chicanes

Tableau 3-4 : aire de passage, distance minimal de passage et espacement entre tubes perpendiculairement au courant en fonction du type du pas des tubes.[11]

	PAS NORMAL CARRÉ OU TRIANGULAIRE	PAS TRIANGULAIRE RENVERSÉ	PAS CARRÉ RENVERSÉ
Espacement entre tubes perpendiculairement au courant	$P$	$P\sqrt{3}$	$P\sqrt{2}$
Distance minimale de passage	$P - d_o$	$2(P - d_o)$	$2(P - d_o)$
Aire de passage : $a_{cT} = z B D_c \frac{P - d_o}{P}$	$\frac{D_c}{P} (P - d_o) B$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{D_c}{P} (P - d_o) B$	$\sqrt{2} \frac{D_c}{P} (P - d_o) B$

Donc :

$$a_{cT} = \frac{D_c}{P} (P - d) \cdot B \dots \dots (16)$$

$$a_{cT} = \frac{1430 \cdot 10^{-3}}{30 \cdot 10^{-3}} (30 \cdot 10^{-3} - 19,05 \cdot 10^{-3}) \cdot 260 \cdot 10^{-3}$$

$$a_{cT} = 0,1363 \text{ m}^2$$

D'après :

$$G_{ct} = \frac{\dot{m}}{a_{cT}}$$

$$G_{ct} = \frac{170118}{0,1363}$$

$$G_{ct} = 1248114,45 \text{ kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$$

a-2) vitesse massique longitudinale  $G_{cl}$

L'évaluation de l'aire de passage  $a_{cL}$  sous la chicane, pour  $G_{cL} = \frac{\dot{m}}{a_{cL}}$  s'effectue en prenant une valeur proportionnelle à la différence : (section intérieure de la calandre – section des tubes).

$$a_{cL} = \frac{\pi}{4} (D_c^2 - N_t \cdot D^2) \cdot x \dots \dots \dots (15)[11]$$

$N_t$  : c'est le nombre total de tubes du faisceau

$x$  : le rapport de l'aire du segment libre à la section intérieure de la calandre.

D'où :

$$G_{cL} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot (D_c^2 - N_t \cdot d^2) \cdot x} \dots \dots (16)[11]$$

Donc :

3-3-2-b) La section intérieure de la calandre  $S_{interieur}$

$$S_{interieur} = \frac{\pi \cdot D_c^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (1430 \cdot 10^{-3})^2}{4}$$

$$S_{interieur} = 1,61 \text{ m}^2$$

3-3-2-c) L'aire du segment libre à la section intérieure de la calandre

$$S_{libre} = S_{interieur} - \frac{\pi \cdot (DLT)^2}{4} \quad [11]$$

$$S_{libre} = 3,035 - \frac{3,14 \cdot (1365 \cdot 10^{-3})^2}{4}$$

$$S_{libre} = 1,61 - 1,46$$

$$S_{libre} = 0,147 \text{ m}^2$$

Donc :

$$x = \frac{S_{libre}}{S_{interieur}} = \frac{0,147}{1,61}$$

$$x = 0,091$$

$$G_{cL} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot (D_c^2 - N_t \cdot D^2) \cdot x}$$

$$G_{cL} = \frac{4 \cdot 170118}{3,14 \cdot (1,430^2 - 1775 \cdot (19,05 \cdot 10^{-3})^2) \cdot 0,091}$$

$$G_{cL} = \frac{680472}{0,40}$$

$$G_{cL} = 1700118,48 \text{ kg/h. m}^2$$

Donc :

$$G_c = \sqrt{G_{cT} \cdot G_{cL}}$$

$$G_c = \sqrt{1253568,35 \cdot 1700118,48}$$

$$G_c = 1456688,86 \text{ kg/h. m}^2$$

On remplace  $G_c$  par sa valeur dans l'équation :

$$\frac{h_2 \cdot D}{\lambda_2} = 0,22 \left( \frac{D \cdot G_c}{\mu_2} \right)^{0,8} \cdot \left( \frac{c_{p2} \cdot \mu_2}{\lambda} \right)^{0,3}$$

$$h_2 = \frac{\lambda_2}{D} 0,22 \left( \frac{D \cdot G_c}{\mu_2} \right)^{0,8} \cdot \left( \frac{c_{p2} \cdot \mu_2}{\lambda_2} \right)^{0,3}$$

0,138 cp = 0,482 Kg/m.h

$$h_2 = \frac{0,5137}{19,05 \cdot 10^{-3}} 0,22 \left( \frac{19,05 \cdot 10^{-3} \cdot 1456688,86}{0,482} \right)^{0,8} \cdot \left( \frac{0,991 \cdot 0,482}{0,5137} \right)^{0,3}$$

$$h_2 = 37319,2 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

### 3-3-3) calcul de la résistance globale d'encrassement dans l'échangeur 123C

$$R_s = \frac{U_p - U_s}{U_p \cdot U_s} [11]$$

$U_p$  : coefficient du transfert de chaleur propre.

$U_s$  : coefficient du transfert de chaleur sale.

3-3-3-a) estimation de la surface d'échange disponible sur l'échangeur

$$S_{\text{disponible}} = Nt \cdot \pi \cdot d \cdot L$$

$$S_{\text{disponible}} = 1775 \cdot 3,14 \cdot 19,05 \cdot 10^{-3} \cdot 10620 \cdot 10^{-3}$$

$$S_{\text{disponible}} = 1127,58 \text{ m}^2$$

3-3-3-b) Calcul du coefficient du transfert sale  $U_s$

$$U_s = \frac{\varphi}{S_{\text{disponible}} \cdot \Delta T_{\text{ml}}} \quad [11]$$

$$U_s = \frac{23,36 \cdot 10^6}{1127,58 \cdot 28,42}$$

$$U_s = 728,95 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

3-3-3-c) Calcul du coefficient du transfert propre  $U_p$

$$U_p = \frac{h_2 h_{ie}}{h_2 + h_{ie}} \quad [11]$$

Où  $h_{ie}$  est le coefficient du film interne rapporté à la surface extérieur.

$$h_{ie} = h_1 \cdot \frac{D_i}{D} \quad [11]$$

$$h_{ie} = 2205,15 \cdot \frac{13,51 \cdot 10^{-3}}{19,05 \cdot 10^{-3}}$$

$$h_{ie} = 1563,86 \text{ kcal/(m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C)}$$

$$U_p = \frac{37319,2 \cdot 1563,86}{37319,2 + 1563,86}$$

$$U_p = 1500,96 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

Remplaçant dans

$$R_s = \frac{U_p - U_s}{U_p \cdot U_s}$$

$$R_s = \frac{1500,96 - 728,95}{1500,96 \cdot 728,95}$$

$$R_s = 0,00069 \text{ m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C/kcal}$$

$$U = \frac{1}{R_s + \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{e}{\lambda}}$$

$$U = \frac{1}{0,00069 + \frac{1}{2234,8} + \frac{1}{37319,2} + \frac{2,77 \cdot 10^{-3}}{37,4724}}$$

$$U = 807,63 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

### 3-4) Calcul de la surface d'échange

D'après l'équation (3)

$$\varphi = U \cdot A \cdot F \cdot \Delta T_{ml}$$

$$A = \frac{\varphi}{U \cdot \Delta T_{ml}}$$

$$A = \frac{23,36 \cdot 10^6}{807,63 \cdot 28,42}$$

$$A = 1017,73 \text{ m}^2$$

La surface d'échange disponible est de 1127,58 m<sup>2</sup> et celle calculée est 1017,73 m<sup>2</sup>, la différence est de 96,65 m<sup>2</sup> environ de 9,03 % de surface disponible.

La différence entre la surface disponible dans l'échangeur et la surface d'échange calculé est due aux nombre et surface des chicanes et les plaques support des tubes qui n'ont pas pris en compte au cours du calcules.

### 3-5) calcul des pertes de charge

Les deux fluides qui traversent l'appareil s'écoulent sous l'effet d'un potentiel mesuré par la différentielle de pression DP entre l'entrée et la sortie et que l'on appelle la perte de charge.

La valeur de cette perte de charge est fonction de la vitesse de circulation du fluide et de leurs caractéristiques physiques : densité et viscosité, ainsi que de la géométrie de l'appareil.

#### 3-5-1) Pertes de charge à l'intérieur des tubes

L'étude fondamentale de l'écoulement des fluides a permis d'établir la formule connue sous le nom d'équation de Fanning, valable en régime isotherme pour une longueur droite L de tuyauterie, de diamètre uniforme di :

$$\Delta P_t = \frac{n_c \cdot n_t G_t^2}{1,271 \cdot 10^{15} \cdot d} \left[ \frac{f_t \cdot L}{D_i} + 2 \right] \text{ en Kg/cm}^2_{[11]}$$

Avec :

$n_c$  : nombre de passe coté calandre.

$n_t$  : nombre de passe coté tube.

$G_t$ : vitesse massique.

$d$  : densité du gaz.

$f_t$ : coefficient de friction, sans dimensions, fonction du nombre de Reynolds.

$\Delta P_t$ : pertes de charge coté tube.

L : longueur des tubes

La valeur du coefficient de friction f en fonction du nombre de Reynolds est donnée par les expressions suivantes :<sup>[11]</sup>

Régime laminaire (Re<2100)

$$f = \frac{32}{Re_1}$$

Régime turbulent ( $Re > 2100$ )

\* Tubes lisses d'échangeurs :  $f = 0,0028 + 0,250 Re_1^{-0,32}$

\* Tubes rigides d'échangeurs :  $f = 0,0070 + 0,528 Re_1^{-0,42}$

Donc :

$$f = 0,007 + 0,528 \cdot 200842,1^{-0,42}$$

$$f = 1,013 \cdot 10^{-2}$$

$$\Delta P_t = \frac{1 \cdot 1 \cdot 1133249,27^2 \cdot 10^3}{1,271 \cdot 10^{15} \cdot 41,4426} \left[ \frac{1,013 \cdot 10^{-2} \cdot 10620 \cdot 10^{-3}}{13,51 \cdot 10^{-3}} + 2 \right]$$

$$\Delta P_t = 0,2429 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\Delta P_t = 0,2381 \text{ Bar}$$

### 3-5-2) Pertes de charges à l'extérieur des tubes (coté calandre)

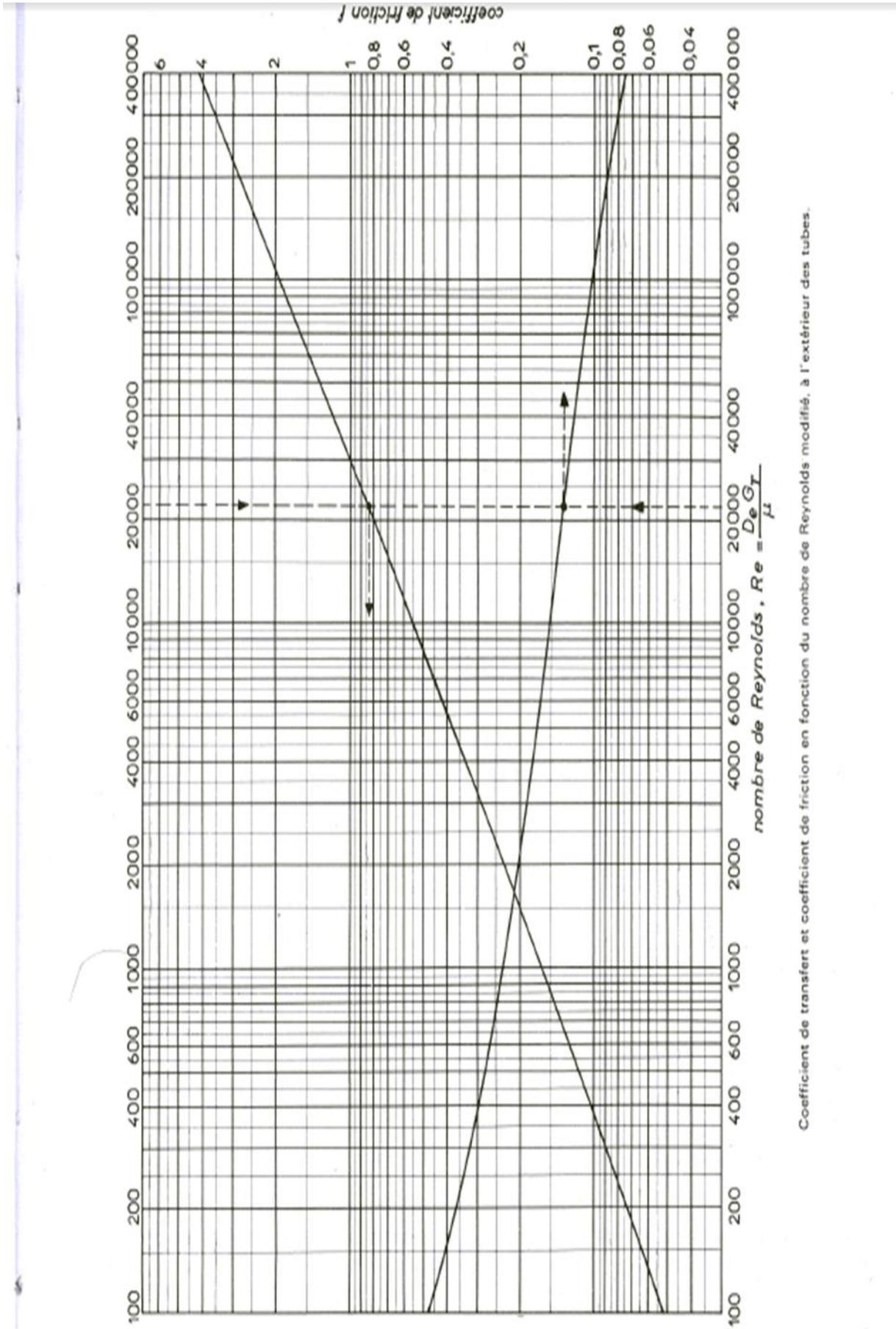
Les facteurs caractérisant l'écoulement dans la calandre sont très nombreux ; le courant principal du fluide s'écoule tantôt perpendiculairement au faisceau, tantôt parallèlement au travers d'une section de passage constamment variable.

Les tolérances de construction introduisent, en outre, des courants secondaires de fuite qui ont d'autant plus d'importance que le diamètre de la calandre est petit.

A l'usage, ces courants secondaires peuvent se développer ou se réduire selon qu'il y a érosion ou colmatage des jeux entre les divers éléments.[11]

$$\Delta P_c = \frac{f \cdot G_{ct}^2 \cdot (N + 1) \cdot D_c}{1,271 D_e \cdot d_c}$$

Le coefficient de friction  $f$  est donné en fonction de  $Re$  à la figure Fig (3-3) et la distance parcourue par les fluides est égale à  $(N + 1) \cdot D_c$ .



Coefficient de transfert et coefficient de friction en fonction du nombre de Reynolds modifié, à l'extérieur des tubes.

Fig3-3 : coefficient de friction en fonction du nombre de Reynolds[11]

$$De = \frac{3,464 \cdot p^2}{\pi \cdot D} - D_{[11]}$$

$$De = \frac{3,464 \cdot (30 \cdot 10^{-3})^2}{3,14 \cdot 19,05 \cdot 10^{-3}} - 19,05 \cdot 10^{-3}$$

$$De = 33,06 \cdot 10^{-3}$$

D'après le graphe :  $f = 0,1275$

$$\Delta P_c = \frac{0,1275 \cdot 1248114,45^2 \cdot (38 + 1) \cdot 1430 \cdot 10^{-3}}{1,271 \cdot 10^{15} \cdot 33,06 \cdot 10^{-3} \cdot 0,86574}$$

$$\Delta P_c = 0,31 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta P_c = 0,3 \text{ Bar}$$

### 3-6) Température de métal des tubes

$$t_t = T_c - \frac{h_{io}}{h_2 + h_{io}} (T_c - t_c)_{[11]}$$

Où :

$t_t$  : Température des tubes

$T_c$  : Température calorique du fluide chaud

$t_c$  : Température calorique du fluide froid<sub>[11]</sub>

Avec :

$$T_c = T_2 + F_c (T_1 - T_2)$$

$$t_c = t_1 + F_c (t_2 - t_1)$$

$F_c$  est déterminé à partir de la figure suivante :

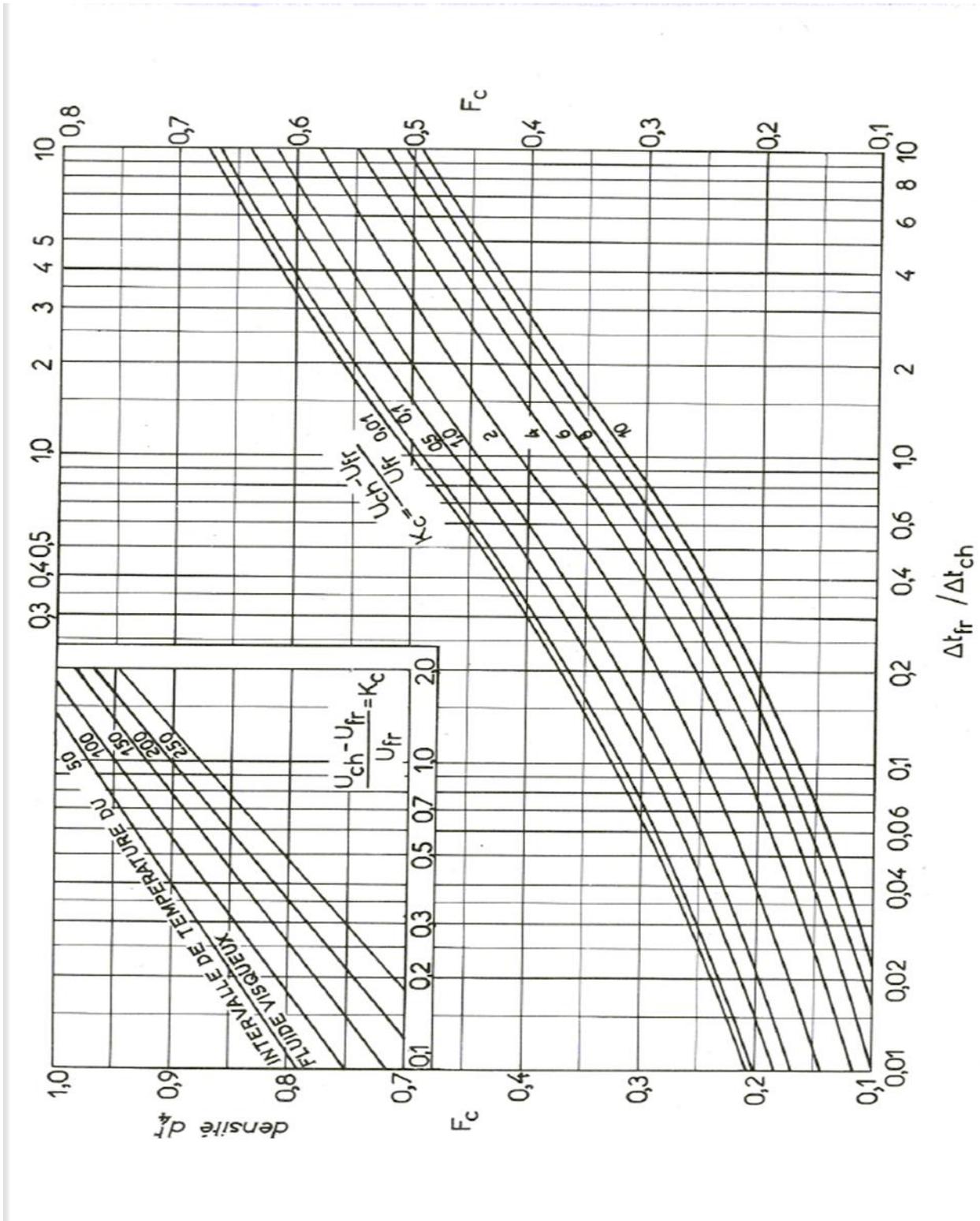


Fig3-4 : facteur  $F_c$  pour déduire les températures caloriques.[11]

Et si  $DTLM < 30^\circ\text{C}$ ,  $F_c = 0,5_{[11]}$

Donc

$$T_c = 166 + 0,5 (290 - 166)$$

$$T_c = 228^\circ\text{C}$$

$$t_c = 130 + 0,5(268 - 130)$$

$$t_c = 199^\circ\text{C}$$

$$t_t = 228 - \frac{1563,86}{37319,2 + 1563,86} (228 - 199)$$

$$t_t = 226,8$$

### 3-7) efficacités de l'échangeur 123C

On définit l'efficacité d'un échangeur comme le rapport du flux de chaleur effectivement transféré dans l'échangeur  $\varphi$  au flux de chaleur maximal qui serait transféré dans les mêmes conditions de températures d'entrée des deux fluides dans un échangeur tubulaire de longueur infinie fonctionnant à contre-courant  $\varphi_{\max_{[12]}}$ :

$$\varepsilon = \frac{\varphi}{\varphi_{\max}}$$

\*\*Cas où le fluide chaud commande le transfert :  $q_{c1} < q_{c2}$  :

$$\varphi_{\max} = q_{c1} (T_{g1} - T_{g2})$$

$$\varphi = q_{c1} (T_{g1} - T_{w2})$$

On définit alors une efficacité de refroidissement :

$$\varepsilon = \frac{(T_{g1} - T_{w2})}{(T_{g1} - T_{w1})}$$

\*\*Cas où le fluide froid commande le transfert :  $q_{c1} > q_{c2}$  :

$$\varphi_{\max} = q_{c2}(T_1 - T_2)$$

$$\varphi = q_{c2}(T_1 - t_2)$$

On définit alors une efficacité de chauffage :

$$\varepsilon = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)}$$

Et comme on a :

$$q_{c1} = 204689,6052 > q_{c2} = 168586,938 \text{ kcal/ (h.}^\circ\text{C)}$$

Alors on dit que l'eau commande le transfert (le fluide froid) :

$$\varepsilon = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)}$$

$$\varepsilon = \frac{(268 - 130)}{(290 - 130)}$$

$$\varepsilon = 86,25$$

#### 4) Conclusion :

On remarque que la surface calculée ( $1017,73\text{m}^2$ ) est proche de celle de l'échangeur ( $1127,58\text{m}^2$ ) et la valeur des pertes de charge qu'on a calculée (0,24 Bar à l'intérieur des tubes et 0,3 Bar à l'extérieur) sont très proches aux pertes de charge donnée par le constructeur (0,26 Bar à l'intérieur des tubes et 0,69 Bar à l'extérieur des tubes).

### Conclusion générale :

Le modeste travail que j'ai élaboré durant ma période de stage à l'entreprise Fertial-Annaba au sien de l'unité d'ammoniac m'a permis de voir le fonctionnement des équipements industriels de prêt, ce qui vient compléter les connaissances acquises durant les années d'études dans l'option génie chimique. Ce stage m'a permis aussi de voir de prêt un échangeur de chaleur TEMA classe R, de comprendre les différentes étapes de réparation lorsqu' il a des problèmes de fissures qui provoquent le passage de l'eau (coté calandre) vers les tubes contenant l'ammoniac et causant la diminution de la qualité du produit vendu sur le marché international.

Le calcul de la surface d'échange a donné une valeur inférieure à celle du design probablement à cause du fait que la présence des surfaces des chicanes et les plaque support autour des tubes n'ont pas pris en compte dans les calculs.

Referenes bibliographique :

[1] <http://www.fertial-dz.com/societe/>

[2] [http:// maps.google.com/](http://maps.google.com/)

[3] Kellogg Job N°5142-ANNABA Description du procédé.

[4] Principes des transferts convectifs - Jacques Padet – 1997.

[5] FOURE LAGADEC, 2 rue de la vallée, 76600 LE HAVRE - FRANCE, PLAN N° : PL 95151-01, Rev 2.

[6] Technologie et documents à l'usage des dessinateurs de bureaux d'études « Pétrole et Pétrochimie ». Charles Antonelli, Fernand Ranchoux, 3<sup>ème</sup> édition, 1976

[7] Technologie des échangeurs thermiques, Alain Garrigue, André Bontemps, Pierre Mercier, Charles Goubier, Jacques Huetz, 1998.

[8] Isométrie des lignes (conduites des effluents) d'unité d'ammoniac Fertial-Annaba

[9] Fertial-Annaba. Structure : inspection et légalisation. Service : inspection-equipement.

[10] P.whuithier, Raffinage et génie chimique, tome I, 1972

[11] P.whuithier, Raffinage et génie chimique, tome II, 1972

[12] Transfert thermiques, cours et 55 exercices corrigés, Yves Jannot, Christian Moyne, 2016.